

APLICAÇÃO DAS NORMAS EUROPEIAS NAS MISTURAS BETUMINOSAS

RICARDO MIGUEL BOAVENTURA DUARTE

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM VIAS DE COMUNICAÇÃO

Orientador: Professor Doutor Jaime Manuel Queirós Ribeiro

JANEIRO DE 2010

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2009/2010

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

Aos meus pais.

Nem todos podem tirar um curso superior. Mas todos podem ter respeito, alta escala de valores e as qualidades de espírito que são a verdadeira riqueza de qualquer pessoa.

Alfred Armand Montapert

AGRADECIMENTOS

A presente dissertação foi desenvolvida no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Civil – Especialização em Vias de Comunicação, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Gostaria de expressar o meu reconhecimento, a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram decisivamente para a sua realização.

Ao meu orientador, Professor Doutor Jaime Queirós Ribeiro, agradeço especialmente pela excelente orientação científica proporcionada. A sua disponibilidade, espírito crítico e constante incentivo foram preponderantes ao longo da realização desta dissertação.

Pelo apoio incondicional demonstrado em todos os momentos, agradeço a toda a minha família, sempre unida, e liderada irrepreensivelmente pela minha bisavó Ludovina e minha avó Maria. Em especial, aos meus pais Avelino e Alzira que, com bastante esforço me proporcionaram as melhores condições possíveis para a realização deste trabalho, expresse o meu profundo reconhecimento e gratidão.

A todos os meus amigos, em especial ao Roberto Botelho, Roberto Mendonça e João Diogo, o meu muito obrigado pela sua amizade e disponibilidade de ajuda em qualquer momento.

Não esquecendo qualquer das etapas precedentes que foram fundamentais na construção das bases para a realização do presente trabalho, de um modo geral, gostaria de expressar os mais sinceros agradecimentos a todos aqueles que estiveram presentes na minha educação e formação até ao momento, prestando um contributo fundamental.

RESUMO

Os pavimentos rodoviários são infra-estruturas de importância fundamental na circulação das pessoas e bens, portanto será essencial garantir o maior nível de qualidade possível, condições de segurança, conforto, economia e qualidade ambiental. Sendo as misturas betuminosas o material mais utilizado nos pavimentos rodoviários em Portugal, o conhecimento das suas características, métodos de ensaio utilizados e sobretudo as especificações que regem a sua utilização torna-se fundamental.

O surgimento recente da obrigatoriedade de marcação CE nas misturas betuminosas, levou a que estas tenham que cumprir determinadas exigências especificadas nas normas europeias referentes a esta temática. Dada a falta de conhecimento e in experiência de utilização destas normas, pretende-se com este trabalho fazer uma análise da aplicação das normas europeias nas misturas betuminosas.

No presente trabalho procurou-se dar a conhecer e entender da melhor forma as normas europeias para misturas betuminosas, dando destaque particular às normas EN 12697, que especificam os métodos de ensaio para misturas betuminosas a quente. A elaboração deste trabalho tem o intuito de contribuir construtivamente no processo de aplicação destas normas europeias, servindo de apoio para a resolução de algumas dificuldades que possam surgir em termos de interpretação e aplicação das mesmas.

A estratégia seguida no desenvolvimento deste trabalho compreende três fases distintas: primeiramente apresentam-se os conhecimentos adquiridos sobre as misturas betuminosas com base num trabalho intenso de pesquisa; de seguida, partindo da análise da série de normas EN 12697, efectuou-se uma organização temática das mesmas e descreveu-se a sua aplicabilidade ao mercado português; finalmente, procedeu-se à análise mais particularizada de alguns métodos de ensaio preconizados nas normas europeias, considerados importantes para este estudo.

É possível verificar no presente trabalho a sua utilidade no aprofundamento do conhecimento acerca da normalização europeia referente a misturas betuminosas, indo de encontro ao principal objectivo proposto para este estudo.

PALAVRAS-CHAVE: Misturas betuminosas, Normas Europeias, Métodos de ensaio, Pavimentos rodoviários, Requisitos da mistura.

ABSTRACT

The road pavement are infrastructure with a fundamental importance in the movement of persons and ware, therefore it will be essential to ensure the best level of quality, safety, comfort, economic, and environmental quality. The bituminous mixtures being the materials most used for the roads in Portugal, the knowledge of these characteristics, methods of tests used and especially the specifications that standardize its use.

The recent emergence of obligations of marking of the CE for the bituminous mixtures implies that these meet the specific requirements of the European standards in reference to this theme. The lack of knowledge and experience in the use of these standards, implies that this work to an analysis of the application of European standards for the bituminous mixtures.

In this work, the objective was to make a definition and knowledge of European standards for the bituminous mixtures, with the standards EN 12697, which specifies the methods of testing for bituminous mixtures hot. The development of this work is intended to contribute to the process for the application of these European standards, serving of support for the resolution of certain difficulties that may appear at the level of interpretation and application.

The development of work is divided into three distinct parts: first the presentation of experience on the bituminous mixtures on the basis of a hard work of research; to continue, with as a basis analysis of the standards EN 12697, it has been carried out a thematic organization and has been described the application on the Portuguese market; finally, a study more specific to certain methods of testing advocated by the European standards has been achieved.

This work showed a major utility through the deepening of knowledge on the European standards in relation with the bituminous mixtures, this combining ideally with the main objective of this study.

KEYWORDS: Bituminous mixtures, European standards, Test methods, Road pavements, Requirements of the mixture.

RÉSUMÉ

Les bitumes sont des infrastructures d'une importance fondamentale dans la circulation de personnes et de biens, il sera donc essentiel de garantir le meilleur des niveaux de qualité, de sécurité, de confort, économique, et de qualité environnementale. Les mélanges bitumineux étant le matériel le plus utilisés pour les routes au Portugal, la connaissance de ces caractéristiques, méthodes d'essais utilisés et surtout les spécifications qui standardisent son utilisation.

L'apparition récente des obligations de marquage de la CE pour les mélanges bitumineux, implique que celles-ci répondent à des exigences spécifiques des normes européennes en référence à ce thème. Le manque de connaissance et d'expérience dans l'utilisation de ces normes, implique que ce travail fasse une analyse de l'application des normes européennes pour les mélanges bitumineux.

Dans ce travail, l'objectif était d'apporter une définition et une connaissance des normes européennes pour les mélanges bitumineux, avec la mise en avant des normes EN 12697, qui spécifie les méthodes d'essais pour les mélanges bitumineux à chaud. L'élaboration de ce travail a pour but de contribuer o processus d'application de ces normes européennes, servant d'appui à la résolution de certaines difficultés qui peuvent apparaître au niveau de l'interprétation et de l'application.

Le développement du travail se divise en trois parties distinctes: premièrement la présentation de l'expérience sur les mélanges bitumineux sur la base d'un travail ardu de recherche; pour poursuivre, avec comme base l'analyse des normes EN 12697, il a été effectué une organisation thématique et a été décrit l'application sur le marché portugais; finalement, une étude plus spécifiques de certaines méthodes d'essais préconisés par les normes européennes a été réalisé.

Ce travail a montré une utilité importante à travers l'approfondissement des connaissances sur les normes européennes en relation avec les mélanges bitumineux, ceci conjuguant idéalement avec le principal objectif de cette étude.

MOTS-CLÉS: Mélanges bitumineux, Les normes européennes, Les méthodes d'essai, Chaussées, Exigences du mélange.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
RÉSUMÉ	vii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO TEMÁTICO	1
1.2. RELEVÂNCIA DO TEMA	2
1.3. OBJECTIVOS	2
1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	3
2. MISTURAS BETUMINOSAS	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS BETUMINOSAS	7
2.3. FORMULAÇÃO DAS MISTURAS BETUMINOSAS	11
2.3.1. EVOLUÇÃO DOS MÉTODOS DE FORMULAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS	12
2.3.2. VANTAGENS E DESVANTAGENS DE CADA MÉTODO DE FORMULAÇÃO	19
2.4. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS BETUMINOSAS - ENSAIO MARSHALL	21
2.5. MARCAÇÃO CE EM MISTURAS BETUMINOSAS	23
3. ANÁLISE DAS NORMAS EN 12697: MÉTODOS DE ENSAIO PARA MISTURAS BETUMINOSAS A QUENTE	25
3.1. ENQUADRAMENTO	25
3.2. APRESENTAÇÃO DAS NORMAS	26
3.3. ORGANIZAÇÃO TEMÁTICA DAS NORMAS	28
3.3.1. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS CONSTITUINTES	30
3.3.2. REQUISITOS GERAIS	32
3.3.3. REQUISITOS EMPÍRICOS	35
3.3.4. REQUISITOS FUNDAMENTAIS	36
3.3.5. PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS	38
3.3.6. COMPACTAÇÃO	39
3.3.7. RESTANTES NORMAS	41

3.4. APLICABILIDADE AO MERCADO PORTUGUÊS	45
3.5. CONCLUSÃO	48
 4. APLICAÇÃO DE ALGUNS MÉTODOS DE ENSAIO (EN 12697).....	 49
4.1. INTRODUÇÃO	49
4.2. PREPARAÇÃO DE PROVETES POR COMPACTADOR DE IMPACTO (EN 12697-30)	50
4.3. DETERMINAÇÃO DA BARIDADE MÁXIMA TEÓRICA (EN 12697-5)	52
4.4. DETERMINAÇÃO DA MASSA VOLÚMICA DE PROVETES BETUMINOSOS (EN 12697-6).....	56
4.5. DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS VAZIOS (EN 12697-8).....	60
4.6. DETERMINAÇÃO DA SENSIBILIDADE À ÁGUA (EN 12697-12).....	62
4.7. CARACTERIZAÇÃO DA RIGIDEZ DE MISTURAS BETUMINOSAS - ENSAIO DE TRACÇÃO INDIRECTA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DE PROVETES CILÍNDRICOS (EN 12697-26)	66
 5. CONCLUSÃO	 69
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
5.2. SUGESTÕES PARA INVESTIGAÇÃO FUTURA	70
 BIBLIOGRAFIA.....	 71

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 - Distribuição típica de tensão sob uma roda com carga P (adaptado de HASS e HUDSON, 1978)	5
Fig. 2 - Composição volumétrica de uma mistura betuminosa (adaptado de Asphalt Institute, 1989) ...	7
Fig. 3 - Representação esquemática da relação entre as diferentes massas volúmicas do material granular de uma mistura betuminosa (Capitão, 1996)	8
Fig. 4 - Equipamento utilizado no ensaio Marshall e esquema do resultado tipicamente obtido (Capitão, 1996).....	12
Fig. 5 – Equipamento de ensaio Wheel tracking (LNEC).....	14
Fig. 6 - Equipamento SST (<i>SUPERPAVE Shear Tester</i>) (FONTE: http://pavementinteractive.org/) ...	17
Fig. 7 - Equipamento ITT (<i>Indirect Tensile Tester</i>) (FONTE: http://www.electrical-res.com/).....	17
Fig. 8 – (a) Compactador Marshall; (b) Estabilómetro Marshall	22
Fig. 9 - Compactador de impacto automático (Fonte: [2]).....	51
Fig. 10 - Realização do ensaio (Método volumétrico)	54
Fig. 11 - Provetes em banho de água	58
Fig. 12 - Índice de vazios no agregado mineral (VMA)	62
Fig. 13 - Provetes submetidos a vácuo.....	64
Fig. 14 - (a) Condicionamento dos provetes à temperatura de ensaio; (b) Ensaio de tracção indirecta.	65
Fig. 15 - Princípio de carregamento e deformação do provete no ensaio de tracção indirecta	67

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Variáveis que afectam as propriedades das misturas betuminosas (Azevedo, 1993)	10
Quadro 2 - Categorias de métodos de formulação e respectivos critérios (adaptado de Luminari and Fidato, 1998)	11
Quadro 3 - Ensaaios a realizar com o equipamento SST e ITT	18
Quadro 4 - Modelos do método de formulação SUPERPAVE.....	18
Quadro 5 - Vantagens e desvantagens de cada categoria de métodos de formulação de misturas betuminosas.....	19
Quadro 6 - Partes constituintes da EN 13108.....	24
Quadro 7 - Partes constituintes da EN 12697.....	26
Quadro 8 - Grupos de normas e respectivo âmbito de aplicação das partes constituintes	29
Quadro 9 - Listagem de ensaios com base nas normas EN 12697 efectuados por alguns laboratórios nacionais.....	45
Quadro 10 – Laboratórios intervenientes no estudo de comparação interlaboratorial LNEC-InIR (FONTE: [1])	47

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO TEMÁTICO

O desenvolvimento económico e social de um país depende, entre outros factores, da mobilidade das pessoas e bens. No caso de Portugal, a rede rodoviária assume um papel fundamental, dado que os transportes rodoviários constituem o principal meio de transporte utilizado.

A rede rodoviária portuguesa tem aumentado a sua extensão, principalmente, desde 1985. O plano rodoviário nacional (PRN), instituído pelo Decreto-Lei n.º 222/98, de 17 de Julho, veio definir a rede rodoviária nacional, constituída pelas redes fundamental e complementar. No entanto, o plano rodoviário nacional tem vindo a sofrer alterações ao longo dos anos, que se traduzem numa melhoria constante das condições da ocupação do solo e do ordenamento do território, tendo sempre subjacente a minimização dos impactes ambientais, o interesse público e das populações em particular, para além de permitirem otimizar a gestão da rede rodoviária nacional. Hoje em dia, para além do desenvolvimento de novas infra-estruturas rodoviárias, previstas no plano rodoviário nacional, surge também a necessidade de redefinir e reabilitar algumas das infra-estruturas já construídas, dado que grande parte destas já se aproximam do final do seu período de vida.

Os pavimentos rodoviários após a sua construção sofrem um processo de degradação sob a acção do tráfego e das condições atmosféricas. Esse processo que ocorre durante a vida útil do pavimento poderá no entanto ser mais lento se o pavimento for bem construído e bem conservado.

Os pavimentos rodoviários classificam-se de acordo com o seu funcionamento estrutural e materiais constituintes em pavimentos rígidos, semi-rígidos e flexíveis. A rede rodoviária Portuguesa é maioritariamente constituída por pavimentos flexíveis.

Ao nível das solicitações do tráfego tem-se registado um aumento do volume e agressividade, ao mesmo tempo que é exigida uma maior qualidade dos pavimentos, no que diz respeito à segurança e comodidade. Deste modo, o aperfeiçoamento dos métodos de dimensionamento de pavimentos e a melhoria do comportamento das misturas betuminosas são fundamentais.

Embora se minimize o aparecimento de degradações associadas aos principais mecanismos de ruína do pavimento, não se consegue impedir a ocorrência de deformações permanentes e de fendilhamento (originados por esforços de tracção e de corte), nem a desagregação da camada superficial do pavimento. Na rede rodoviária nacional pode observar-se uma evolução significativa deste tipo de degradações dos pavimentos flexíveis. Este facto pode ser originado, em parte, por um comportamento inadequado das misturas betuminosas. Assim, é fundamental que se continue a estudar o

comportamento das misturas betuminosas em serviço, para se adequar a sua composição e comportamento às novas exigências dum tráfego cada vez mais agressivo.

Para garantir um comportamento adequado das misturas betuminosas torna-se necessário analisar devidamente a sua composição, que é estudada, recorrendo à utilização dos métodos de formulação. O objectivo desses métodos é definir a composição das misturas betuminosas para garantir a obtenção de propriedades mínimas especificadas em função de determinados critérios de ruína.

Os métodos de ensaio utilizados na caracterização das misturas betuminosas têm vindo a ser desenvolvidos constantemente, por forma conseguir determinar com maior realismo as suas propriedades, que devem respeitar os valores indicados nas especificações.

A recente necessidade de dar cumprimento às normas europeias que especificam os produtos e que materializam a satisfação dos seus requisitos, no âmbito da marcação CE para misturas betuminosas, aumentou significativamente a exigência requerida para os produtores de misturas betuminosas. Portanto, torna-se fulcral o conhecimento detalhado da normalização europeia que especifica todos os requisitos necessários à certificação das misturas betuminosas.

Actualmente em Portugal, o conhecimento desta nova normalização europeia ainda é escasso e a sua aplicação tem vindo a ser gradual. Algumas dificuldades têm vindo a sentir-se no meio técnico nacional, especialmente na aplicação da normalização europeia que especifica os métodos de ensaio para as misturas betuminosas, dada a falta de experiência e conhecimento.

1.2. RELEVÂNCIA DO TEMA

A análise efectuada no âmbito da presente dissertação, dos métodos de ensaio para misturas betuminosas preconizados nas novas normas europeias, visa sobretudo dar a conhecer e melhor entender estas normas, sendo uma mais-valia para acelerar o seu processo de aplicação no mercado português. A importância deste estudo torna-se acrescida, dada a necessidade de aplicação destas normas, de forma a fazer cumprir a satisfação dos requisitos impostos pela marcação CE nas misturas betuminosas.

Tendo em vista contribuir construtivamente para a resolução de algumas dificuldades sentidas pelos especialistas nacionais na aplicação das normas europeias referentes aos métodos de ensaio para as misturas betuminosas, assume também especial relevância a análise da aplicação das normas europeias referentes a esta temática.

1.3. OBJECTIVOS

Este trabalho tem como objectivo principal a análise das normas europeias referentes aos métodos de ensaio para misturas betuminosas (EN 12697).

A análise da aplicabilidade destas normas ao mercado português e implicações decorrentes dessa aplicação, também são outros dos objectivos que se pretende atingir com a realização deste trabalho.

De forma a conseguir atingir estes objectivos, são analisadas todas as normas europeias de métodos de ensaio para misturas betuminosas, adoptando-se uma subdivisão de normas que as organiza tematicamente. Além disto, é feito um levantamento dos métodos de ensaio para misturas betuminosas utilizados por alguns laboratórios nacionais, caracterizando assim o estado actual de aplicação das normas europeias nas misturas betuminosas.

1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A metodologia utilizada na realização deste trabalho contempla as etapas seguintes: pesquisa bibliográfica, análise e interpretação das normas e finalmente, a organização do trabalho.

Em seguida descreve-se a organização do trabalho, que se encontra dividido em cinco capítulos, tendo em vista a concretização dos objectivos propostos.

No primeiro capítulo, procura-se efectuar uma introdução ao tema do presente trabalho, expondo também a importância do tema em estudo, assim como os principais objectivos a atingir com a realização do trabalho e sua organização.

No segundo capítulo, sintetizam-se os conhecimentos adquiridos sobre misturas betuminosas, que são o principal “objecto de estudo” do presente trabalho. Descreve-se a caracterização e composição das misturas betuminosas, assim como os métodos de formulação, aos quais se pode recorrer para estudar a composição das misturas betuminosas, indicando as vantagens e desvantagens da aplicação de cada método. Aborda-se ainda o método de ensaio mais utilizado na caracterização das misturas betuminosas (Método Marshall). Finalmente, é feita uma análise ao processo de marcação CE em misturas betuminosas e normas que lhe estão associadas.

No terceiro capítulo, é feita uma apresentação e análise das normas europeias de métodos de ensaio para misturas betuminosas, fazendo uma subdivisão de normas que as organiza tematicamente. São também apresentadas as listas de ensaios utilizados por alguns laboratórios nacionais para misturas betuminosas, no âmbito de uma caracterização do estado actual de aplicação das normas europeias nas misturas betuminosas.

No quarto capítulo, continua-se a análise das normas europeias, mas incide-se particularmente sobre alguns métodos de ensaio seleccionados criteriosamente para serem analisados. Procura-se então descrever, de forma sucinta, o modo de aplicação destes métodos de ensaio seleccionados.

No quinto capítulo, são apresentadas as considerações finais do trabalho realizado, discutindo-se as principais conclusões face ao trabalho efectuado. São também apresentadas as questões mais significativas para investigações futuras, no âmbito desta temática.

2

MISTURAS BETUMINOSAS

2.1. INTRODUÇÃO

As misturas betuminosas são compostas por betume e agregados, eventualmente com adição de aditivos ou produtos especiais, misturados de forma uniforme e em proporções adequadas, de modo a formar uma massa homogénea. Estas misturas podem ser realizadas a frio ou a quente. A sua principal aplicação é sobretudo nas camadas superiores dos pavimentos flexíveis e semi-rígidos. Recebendo directamente a acção do tráfego e do clima, estas, devem ser suficientemente resistentes para que a via cumpra bem o papel que lhe é destinado.

A figura 1 ilustra a distribuição das tensões verticais e horizontais, sob o centro de uma carga por roda, num pavimento flexível.

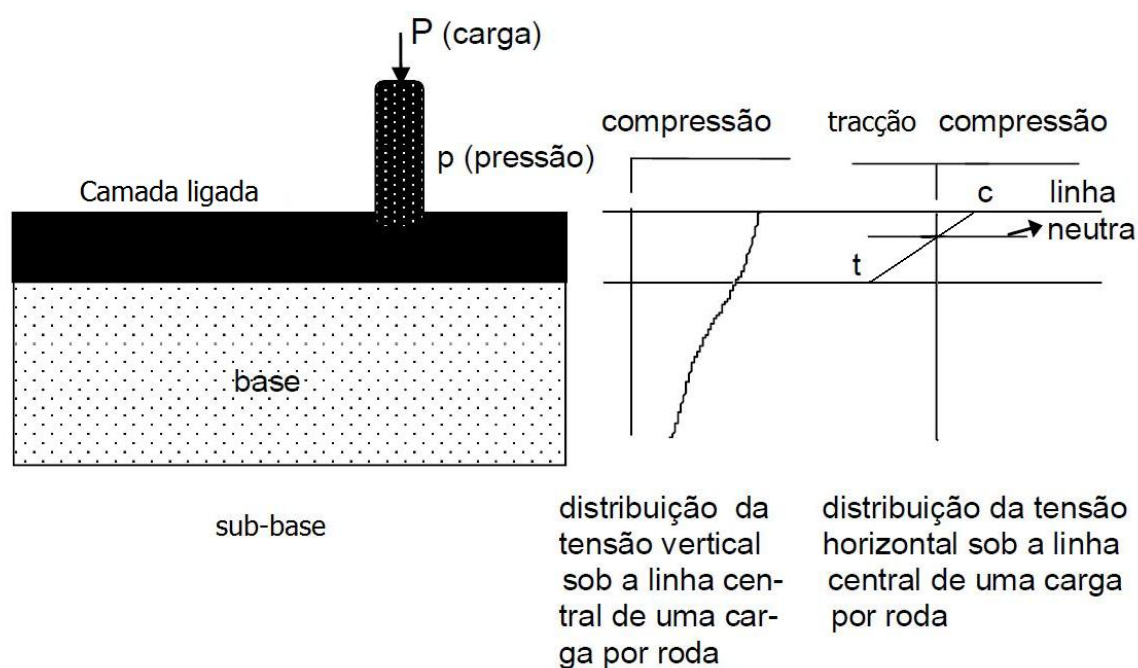


Fig. 1 - Distribuição típica de tensão sob uma roda com carga P (Adaptado de HASS e HUDSON, 1978)

É possível observar que a camada ligada, por ser constituída por uma mistura de agregado mais ligante betuminoso, oferece resistência tanto à tracção como à compressão. A função de resistir aos esforços de tracção atribui-se à presença do ligante betuminoso que actua aglutinando os agregados e conferindo à mistura um ganho de resistência. Já a camada de base, os materiais granulares que a compõem não oferecem resistência à tracção, sendo portanto mobilizadas apenas as tensões de compressão e corte.

Com o aumento das solicitações e das exigências de qualidade dos pavimentos verifica-se que a espessura total das camadas betuminosas dos pavimentos é cada vez maior. Contudo, embora se aumente a rigidez dos pavimentos, isto não implica, necessariamente, uma diminuição nas tensões que actuam nas misturas betuminosas situadas nas camadas superiores do pavimento. Assim, é necessário atender sobretudo ao comportamento das misturas betuminosas utilizadas nessas camadas.

O comportamento duma mistura betuminosa depende do desempenho global do pavimento. Na fase de formulação duma mistura betuminosa, deve considerar-se a estrutura do pavimento em que camada a mistura betuminosa será aplicada (e as suas principais funções) e as acções do tráfego e do clima a actuar sobre o pavimento. A composição a escolher e as exigências colocadas à mistura betuminosa dependem desses factores.

As misturas betuminosas aplicadas em pavimentos devem obedecer a determinadas exigências de qualidade para que durante a sua vida útil desempenhem de forma adequada as funções das camadas de pavimento em que se inserem. De entre essas exigências destacam-se as seguintes (Antunes, 2003):

a) Durante a fase construtiva:

- Trabalhabilidade;
- Manutenção das características durante o fabrico e aplicação.

b) Após a entrada em serviço:

- Características estruturais:
 - Rigidez;
 - Resistência ao fendilhamento;
 - Resistência às deformações permanentes.
- Características superficiais
 - Coeficiente de atrito;
 - Drenagem superficial (macro-textura);
 - Minimização do encadeamento e reflectividade;
 - Minimização do desgaste dos pneus e da resistência ao rolamento;
 - Minimização do ruído de rolamento.
- Durabilidade
 - Resistência às acções climáticas;
 - Resistência a produtos químicos;
 - Resistência ao desgaste induzido pela passagem dos veículos;
 - Resistência às acções internas (expansão, contracção);
 - Compatibilidade entre o agregado e o ligante betuminoso.

As misturas betuminosas diferem entre si de acordo com a aplicação a que se destinam essencialmente em termos do tipo do agregado utilizado (em particular a sua natureza e granulometria), do tipo e percentagem de ligante betuminoso e do método de fabrico e aplicação em obra.

As principais propriedades a exigir das misturas betuminosas são as seguintes (i) estabilidade; (ii) durabilidade; (iii) flexibilidade; (iv) resistência à fadiga; (v) resistência à derrapagem; (vi) impermeabilidade; (vii) trabalhabilidade.

No ponto 2.2. deste capítulo procura-se descrever a composição das misturas betuminosas. A composição de uma mistura betuminosa é geralmente estabelecida com base num estudo de formulação no qual se definem os componentes a utilizar na mistura e suas proporções de acordo com as especificações e os cadernos de encargos.

É feita referência à evolução dos métodos de formulação das misturas betuminosas no ponto 2.3 do presente capítulo, onde são também definidas as principais características de cada método de formulação assim como as vantagens e desvantagens relativamente ao estado actual de conhecimentos.

No ponto 2.4. do presente capítulo, descreve-se resumidamente os procedimentos de realização do ensaio Marshall, de acordo com a normalização europeia. O ensaio Marshall é utilizado com vista a determinar as características das misturas betuminosas que servirão de base para a aplicação do Método Marshall, o método de formulação de misturas betuminosas mais utilizado em Portugal.

A partir de 1 de Março de 2008, entrou em vigor a obrigatoriedade da marcação CE em misturas betuminosas, com vista a supressão de barreiras técnicas que permitam a comercialização dos produtos no seio da comunidade Europeia. O ponto 2.5. deste capítulo reporta-se a este processo de marcação CE em misturas betuminosas, apresentando o enquadramento legal em que se encontra, a normalização “harmonizada” que lhe serve de base e vantagens e desvantagens da marcação CE em misturas betuminosas.

2.2. COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS BETUMINOSAS

O estudo da composição das misturas betuminosas é fundamental para que estas tenham um desempenho adequado em serviço. O comportamento das misturas betuminosas no pavimento depende, em parte, da sua composição volumétrica. Na figura 2 esquematiza-se a composição duma mistura betuminosa compactada.

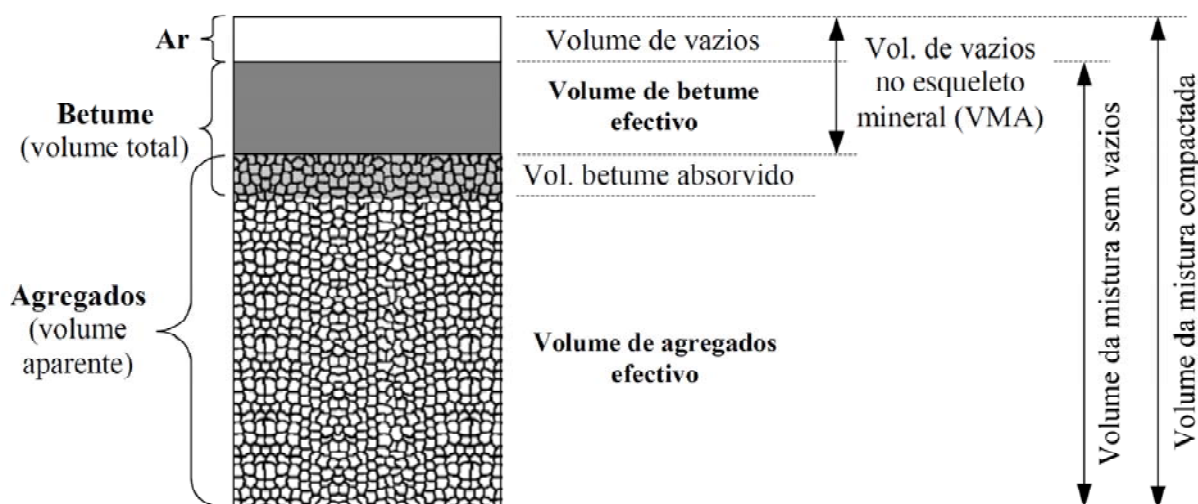


Fig. 2 - Composição volumétrica de uma mistura betuminosa (adaptado de Asphalt Institute, 1989)

Para uma melhor compreensão dos vários parâmetros volumétricos de composição, na figura 3 apresenta-se a sua representação esquemática.

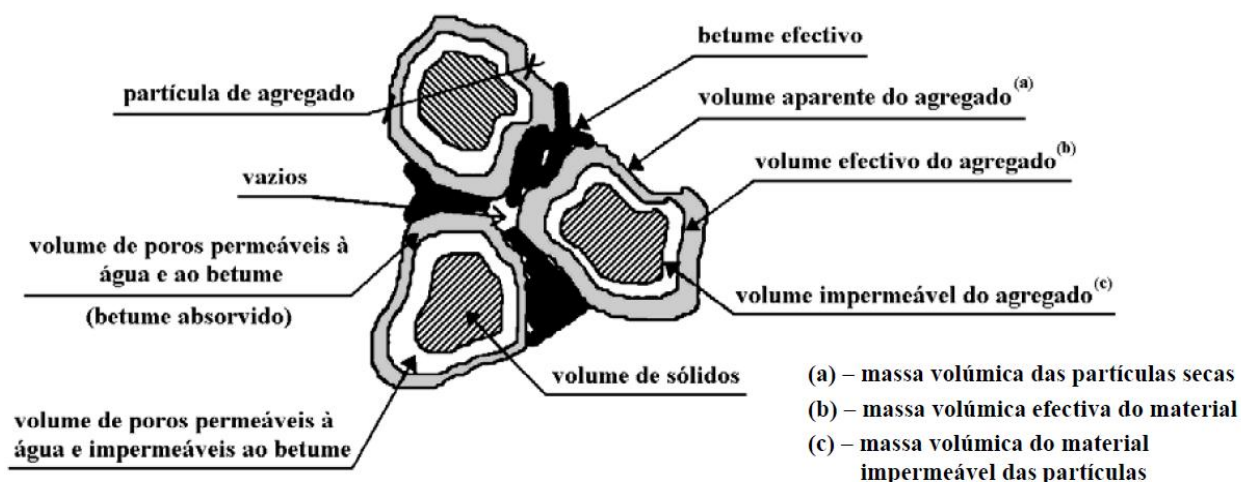


Fig. 3 - Representação esquemática da relação entre as diferentes massas volúmicas do material granular de uma mistura betuminosa (Capitão, 1996)

Como é possível observar nas figuras 2 e 3, os principais materiais que compõem as misturas betuminosas são o ligante betuminoso e os agregados. Além disso, há sempre um determinado volume da mistura betuminosa compactada que é ocupado por ar (volume de vazios). Para melhorar certas características da mistura betuminosa podem ser acrescentados aditivos (por exemplo, polímeros, para aumentar a flexibilidade, ou derivados químicos da amónia, para aumentar a ligação mastique-agregado).

Cada um dos componentes da mistura betuminosa desempenha determinadas funções. Os agregados exercem diferentes funções na mistura betuminosa, dependendo das suas dimensões (agregados grossos, finos e fíler). Os agregados grossos desempenham as seguintes funções na mistura betuminosa:

- garantir estabilidade à mistura betuminosa (resistência às deformações permanentes);
- aumentar a resistência mecânica das misturas betuminosas (aumento do módulos de rigidez das misturas betuminosas);
- assegurar rugosidade superficial suficiente para a circulação dos veículos (capacidade da mistura betuminosa de garantir a aderência pneu-pavimento).

Os agregados finos, de dimensões inferiores a 2,00 mm (Texas Department of Transportation, 2004), permitem que as misturas betuminosas obtenham estabilidade e compacidade (propriedade relacionada com o arranjo estrutural dos agregados, controlada pelo valor do volume de vazios no esqueleto mineral - VMA).

O fíler (material passado no peneiro #200) é responsável pela compacidade e impermeabilidade da mistura betuminosa. Além disso, as características físicas e químicas do fíler influenciam o comportamento da mistura betuminosa (por exemplo, a utilização de um fíler calcário ou a adição de cal hidráulica melhora a ligação agregado-mastique).

O ligante betuminoso ocupa uma parte do volume de vazios no esqueleto mineral da mistura betuminosa e há ainda uma determinada quantidade de betume absorvido pelos agregados, a qual depende da porosidade dos agregados. O ligante betuminoso desempenha as seguintes funções na mistura betuminosa:

- permitir a ligação entre os agregados, de modo a que a mistura betuminosa tenha resistência à tracção;
- garantir flexibilidade à mistura betuminosa (resistência ao fendilhamento sob a acção das cargas);
- assegurar impermeabilidade e durabilidade à mistura betuminosa (resistência à acção dos agentes climáticos);
- conferir trabalhabilidade à mistura betuminosa, garantindo condições adequadas de produção em central e compactação *in situ*.

Os vazios desempenham igualmente um papel importante nas misturas betuminosas. De facto, as misturas betuminosas com um volume de vazios elevado são mais permeáveis, menos duráveis e têm uma menor resistência às deformações permanentes que ocorrem devido à pós-compactação realizada pelo tráfego. As excepções são as misturas betuminosas porosas e drenantes, que utilizam aditivos e técnicas construtivas adequadas para anular ou diminuir os efeitos negativos do elevado volume de vazios. Quando o volume de vazios é demasiado baixo (inferior a 3%), surgem problemas de estabilidade da mistura betuminosa, havendo uma forte aptidão para a ocorrência de deformações permanentes e para a exsudação do ligante.

Os agregados utilizados na mistura betuminosa não devem ser muito porosos (nesse caso a quantidade total de betume necessário para produzir a mistura será mais elevada), nem totalmente impermeáveis, porque a adesividade do betume aos agregados será reduzida.

Para cada camada do pavimento, e em cada situação específica de tráfego e clima, é fundamental que se seleccione o tipo de mistura betuminosa mais adequado a utilizar (dependendo do tipo e espessura da camada onde a mistura betuminosa será aplicada, e das suas funções).

A composição volumétrica da mistura betuminosa deve ser estudada em pormenor, durante a formulação, para que esta possa ter um desempenho adequado em serviço. Essencialmente, determina-se a relação entre as diversas fracções dos agregados (curva granulométrica), a percentagem em betume e o volume de vazios que, para determinado ligante e agregados, garantem um comportamento adequado da mistura betuminosa.

Para que as misturas betuminosas tenham um comportamento adequado em serviço, é necessário que estas possuam determinadas características. Em função do tipo de mistura betuminosa a formular, e dependendo das condições em que a mistura será aplicada e funcionará em serviço, algumas destas características são mais importantes que outras.

Quando se procede à formulação duma mistura betuminosa, devem ser escolhidos os ensaios de caracterização mais apropriados, em função das condições específicas em que a mistura betuminosa vai funcionar em serviço. Assim, por exemplo, em climas frios é fundamental estudar o fendilhamento térmico a baixas temperaturas, enquanto que, em climas moderados a quentes é muito mais importante avaliar a resistência às deformações permanentes nas misturas betuminosas. Ao mesmo tempo, também é importante conhecer a influência da composição volumétrica no comportamento das misturas betuminosas, conforme se apresenta no quadro 1.

Quadro 1 - Variáveis que afectam as propriedades das misturas betuminosas (Azevedo, 1993)

Propriedades	Definição	Variáveis que afectam as propriedades das misturas betuminosas
Flexibilidade	Aptidão da mistura em se adaptar às deformações das camadas subjacentes	- Granulometria - Teor em betume - Rigidez do betume
Estabilidade	Resistência às deformações plásticas (usualmente a altas temperaturas e longos tempos de carga)	- Textura da superfície do agregado - Granulometria - Teor em betume
Durabilidade	Resistência às acções climáticas (ar e água) e à acção abrasiva do tráfego	- Granulometria - Teor em betume - Grau de compactação - Sensibilidade à água
Resistência à fadiga	Aptidão da mistura em resistir a esforços de flexão repetidos sem fendilhar	- Granulometria - Teor em betume - Rigidez do betume - Grau de compactação
Resistência à derrapagem	Aptidão da mistura para proporcionar um adequado coeficiente de atrito entre o pneu e o pavimento molhado	- Tipo e textura do agregado - Resistência do agregado ao polimento - Granulometria
Impermeabilidade	Aptidão da mistura em impedir o acesso da água às camadas inferiores	- Granulometria - Teor em betume - Grau de compactação
Trabalhabilidade	Facilidade para realizar as operações de fabrico, colocação e compactação	- Granulometria - Teor em betume - Tipo de betume e de agregado

Em geral, verifica-se que um aumento do teor em betume aumenta a resistência ao fendilhamento, a trabalhabilidade, a impermeabilidade e a durabilidade, mas, em contrapartida, diminui a resistência às deformações permanentes e a aderência pneu-pavimento.

A utilização de aditivos permite modificar várias características das misturas betuminosas, sem alterar a sua composição, ao melhorar a resistência ao fendilhamento (betume modificado com polímeros) e a adesividade (agentes de adesividade) ou ao diminuir a susceptibilidade térmica (plastificantes), entre outras.

Conforme se observou, o comportamento das misturas betuminosas depende das características de cada um dos componentes elementares que a compõem. Assim, durante o estudo das misturas betuminosas, impõe-se que os agregados e o ligante betuminoso sejam correctamente caracterizados, de modo a que o desempenho das misturas betuminosas não seja comprometido pelo comportamento inadequado dos seus constituintes.

2.3. FORMULAÇÃO DAS MISTURAS BETUMINOSAS

A formulação de uma mistura betuminosa consiste num conjunto de procedimentos e ensaios realizados para estabelecer as dosagens dos seus constituintes, que permitem que a mistura cumpra determinadas exigências. E para que as misturas betuminosas cumpram adequadamente a sua função é essencial que se assegure uma boa qualidade, não só em termos de fabrico e colocação em obra, mas também ao nível do desempenho durante o período de serviço. Neste último aspecto, a formulação das misturas é fundamental, na medida em que a fórmula para execução seleccionada condicionará as características mecânicas da mistura.

No sentido de auxiliar a exposição dos diferentes métodos de formulação, estes foram reunidos em categorias (Luminari and Fidato, 1998):

- Tipo “receita”;
- Empíricos;
- Analíticos;
- Volumétricos;
- Relacionados com o comportamento das misturas betuminosas;
- Baseados no comportamento das misturas betuminosas.

Segundo estes autores, de acordo com o quadro 2, foram considerados nove critérios para classificar as diferentes categorias de métodos de formulação.

Quadro 2 - Categorias de métodos de formulação e respectivos critérios (adaptado de Luminari and Fidato, 1998)

Categorias de métodos de formulação	Critérios em que se baseia a formulação								
	Baseada na experiência com misturas de composição conhecida	Produção e compactação de provetes	Críticos volumétricos	Análise e composição volumétrica	Compactação de provetes reproduz o processo <i>in situ</i>	Utilização de ensaios Empíricos	Utilização de ensaios de Simulação	Utilização de ensaios Fundamentais	Modelo de previsão do comportamento no pavimento
Tipo “receita”	X								
Empíricos		X	X			X			
Analíticos		X	X	X		X			
Volumétricos		X	X	X	X		X		
Relacionados com o comportamento das misturas betuminosas		X	X	X	X		X	X	
Baseados no comportamento das misturas betuminosas		X	X	X	X		X	X	X

2.3.1. EVOLUÇÃO DOS MÉTODOS DE FORMULAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS

Ao longo dos anos, a necessidade de obter misturas betuminosas com melhor qualidade, associada ao aperfeiçoamento dos equipamentos de ensaio disponíveis, levou à evolução dos métodos de formulação de misturas betuminosas. Até meados do século XX, a formulação de misturas betuminosas era realizada através de especificações ou “receitas” pelas quais se obteve resultados positivos face à experiência acumulada na sua utilização.

Os **métodos tipo “receita”** baseiam-se na utilização de misturas betuminosas tradicionais de composição conhecida que, após longos períodos de tempo de aplicação, para certas condições de tráfego e de clima e materiais, revelaram ter desempenhos satisfatórios.

A mistura betuminosa é definida por uma determinada especificação, tendo em conta a granulometria dos agregados, o tipo e teor em betume, a espessura da camada e as condições de fabrico na central, a colocação e compactação (temperaturas e tipos de compactação). Nestes métodos, não é exigida a preparação de provetes para ensaio ou para análise volumétrica.

Assim, as “receitas” assumem a forma de especificações relativamente rigorosas, no que diz respeito a determinadas características da mistura betuminosa e dos seus componentes. Em alguns países europeus, como é o caso do Reino Unido, da Alemanha e da Finlândia, onde já se utilizam métodos mais rigorosos, a maioria das misturas betuminosas a quente são definidas desta forma, essencialmente em estradas com tráfego pouco intenso.

Mais tarde surgiram nos Estados Unidos da América os **métodos de formulação empíricos** (sendo o método de Marshall o mais conhecido), que foi o primeiro passo para a evolução dos métodos de formulação. A figura 4 apresenta de seguida o esquema do resultado tipicamente obtido no método Marshall, assim como o equipamento utilizado neste mesmo ensaio.

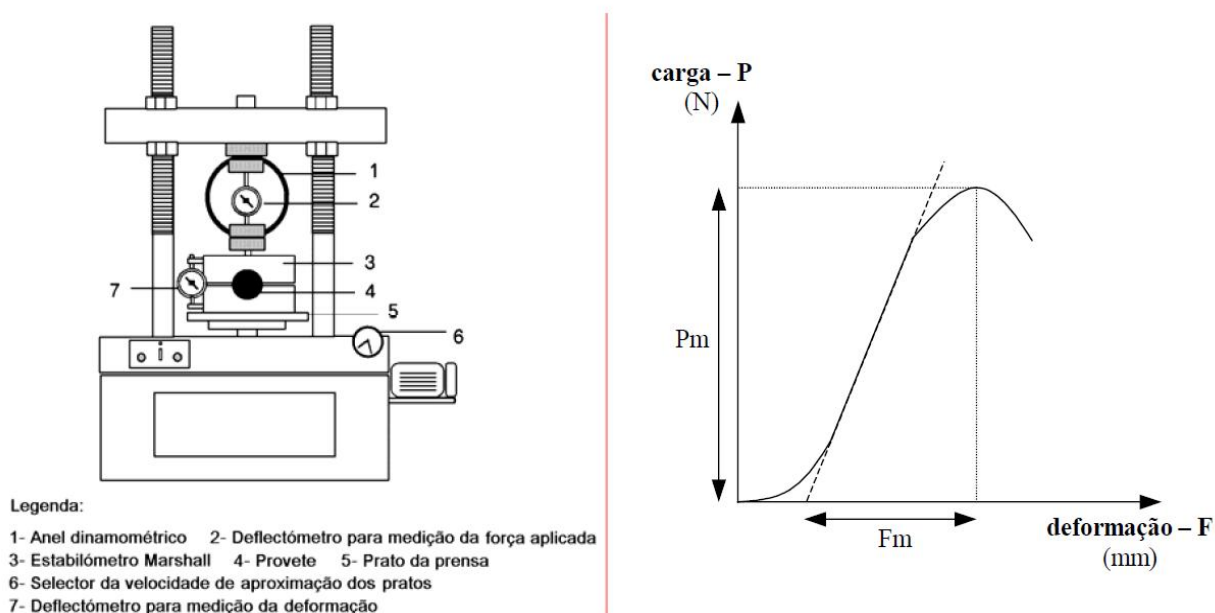


Fig. 4 - Equipamento utilizado no ensaio Marshall e esquema do resultado tipicamente obtido (Capitão, 1996)

Os métodos de formulação empíricos fundamentam-se na determinação da percentagem em betume, de modo a otimizar diversas variáveis determinadas em ensaios (a estabilidade e a deformação), atendendo aos limites impostos fundamentados na experiência acumulada, incluindo os limites determinados pela análise da porosidade.

Algumas variáveis consistem em parâmetros volumétricos (baridade, porosidade) e outras são obtidas através de ensaios mecânicos empíricos, sobre provetes preparados através dum processo de produção e compactação que não reproduz as condições existentes *in situ*. Através da análise de diversas variáveis (estabilidade, deformação, porosidade, baridade), obtidas em provetes com diferentes percentagens em betume, procede-se à escolha da percentagem óptima em betume, como sendo aquela que otimiza o valor dessas variáveis, podendo recorrer-se à experiência anterior com ensaios semelhantes.

Como mencionado anteriormente, o método de Marshall é o mais conhecido desta categoria de métodos de formulação, e baseia-se na utilização dum ensaio de compressão diametral ou tracção indirecta, no qual é medida a estabilidade (resistência à deformação) dum provete submetido a um aumento de deformação constante. O ensaio de compressão associado ao método de Marshall foi recentemente normalizado pelo CEN (EN 12697-34).

Além deste método, existem outros métodos de formulação que se baseiam em ensaios empíricos bastante conhecidos, como os seguintes: o método de Duriez, que utiliza um ensaio de compressão uniaxial desenvolvido em França pelo LCPC (ensaio este que continua a ser utilizado na actual normalização AFNOR); o método Hveem, que utiliza um ensaio triaxial desenvolvido nos Estados Unidos.

A larga experiência resultante do uso destes métodos ao longo de décadas, como ainda é o caso do método de *Marshall* em Portugal, permite estimar razoavelmente o comportamento das misturas em função da sua composição e dos parâmetros de ensaio. No entanto, os métodos empíricos não permitem medir directamente as propriedades mecânicas fundamentais e incorporam procedimentos desajustados a inovações tecnológicas e a novos materiais de pavimentação rodoviária.

Apesar do método de Marshall continuar a ser o mais utilizado, há alguns anos atrás começou a sentir-se a necessidade de um método que tivesse em conta, de uma forma mais completa, as propriedades mecânicas de uma mistura betuminosa. Esta necessidade deriva do facto de os pavimentos estarem sujeitos a solicitações muito severas em termos de tráfego e de as exigências dos utentes serem hoje em dia maiores do que eram há alguns anos atrás. Impõe-se por isso que as propriedades assumidas pelo projectista e que importam ao funcionamento estrutural do pavimento sejam verificadas no material a aplicar nas camadas que o constituem. Estes aspectos chamaram à atenção da comunidade científica para a necessidade de rever os métodos de formulação modernizando-os.

Os principais aspectos que se procurou abordar de forma a tornar os estudos laboratoriais mais representativos das condições *in situ* foram os métodos de compactação e os ensaios mecânicos. A preparação dos provetes em laboratório efectuada por processos de compactação com base no impacto, calcamento ou vibração e os ensaios mecânicos efectuados variam desde os de compressão uniaxial e os de compressão diametral até aos triaxiais. Surgiram então ensaios que permitem avaliar determinadas propriedades das misturas betuminosas, podendo recorrer-se aos seguintes ensaios para formulação das misturas betuminosas: ensaios empíricos, ensaios fundamentais e ensaios de simulação.

Os ensaios empíricos permitem conhecer genericamente o comportamento das misturas mas não determinam as suas propriedades intrínsecas. Por exemplo, o resultado obtido no ensaio de Marshall apenas permite avaliar, genericamente, o comportamento da mistura betuminosa, não sendo possível determinar, por exemplo, o módulo de rigidez. Nestes ensaios as condições de carregamento e compactação não são representativas das condições de serviço.

Os ensaios fundamentais permitem determinar as propriedades intrínsecas das misturas betuminosas e a avaliação do seu comportamento em serviço. O ensaio de flexão por fadiga é um ensaio deste tipo e que permite determinar o módulo de rigidez de uma mistura (propriedade intrínseca) e a sua vida à fadiga (propriedade do seu comportamento). As propriedades das misturas obtidas nestes ensaios podem ser utilizadas em modelos mecanicistas de dimensionamento do pavimento.

Os ensaios de simulação permitem simular e reproduzir em laboratório os processos de espalhamento e compactação *in situ* (por exemplo, o compactador de corte giratório), ou o comportamento da mistura betuminosa durante o período de vida do pavimento quando sujeita à acção do tráfego (por exemplo, o ensaio *wheel tracking*). No entanto, estes ensaios não conseguem determinar propriedades intrínsecas da mistura betuminosa.

Apresenta-se na figura 5 o equipamento utilizado no ensaio Wheel tracking.

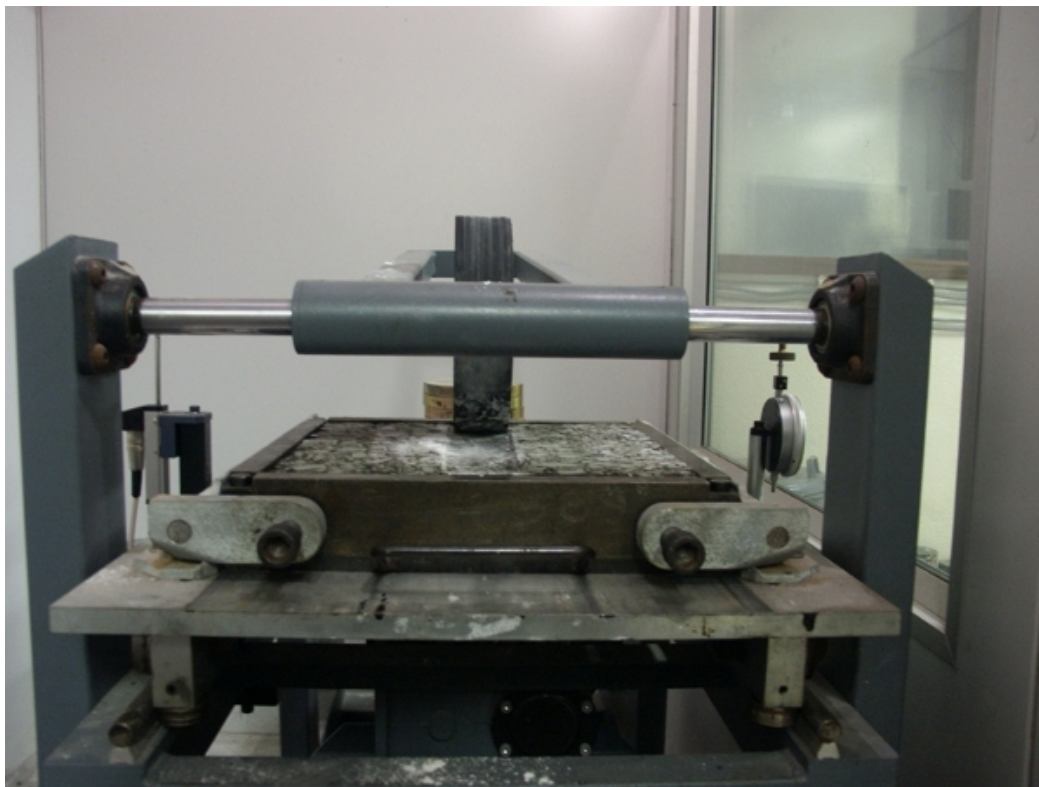


Fig. 5 – Equipamento de ensaio Wheel tracking (LNEC)

Os ensaios fundamentais e de simulação utilizam equipamentos que permitem aplicar modos de carregamento mais complexos que os tradicionais ensaios empíricos. Assim, esses ensaios procuram simular o funcionamento das misturas betuminosas em serviço, ao representar aproximadamente a distribuição de tensões ou extensões no pavimento que originam determinada degradação.

A tendência é a de substituir ou complementar a abordagem por métodos empíricos pela abordagem por métodos fundamentais, baseados em ensaios mecânicos dos quais resultem propriedades fundamentais dos materiais, que traduzam o comportamento quando em serviço. No entanto, a complexidade deste tipo de ensaios utilizados para caracterizar as misturas betuminosas, originou um aumento do tempo e dos custos associados ao processo de formulação.

Este facto levou ao desenvolvimento, na Bélgica, de **métodos analíticos** que procuram caracterizar as misturas betuminosas através de cálculos analíticos, envolvendo propriedades volumétricas, reduzindo assim o número de ensaios realizados.

O método analítico de formulação permite o cálculo volumétrico da composição da mistura betuminosa (curva granulométrica dos agregados, teor em betume e volume de vazios). A produção de provetes não é obrigatória, embora devam ser preparados e ensaiados provetes, em número reduzido, para confirmar a formulação analítica. A composição da mistura betuminosa é determinada com base em fórmulas analíticas determinadas a partir das relações volumétricas entre os componentes da mistura. A comparação entre os resultados obtidos analiticamente, em ensaios e *in situ*, demonstrou que este método de formulação utiliza fórmulas analíticas bastante ajustadas à realidade.

A principal vantagem deste método de formulação é a de permitir obter a composição base das misturas betuminosas sem ser obrigatória a produção de provetes. No entanto, embora a composição de base seja obtida através de fórmulas analíticas, aconselha-se a utilização de um ensaio para a verificação experimental, para que essa composição possa ser considerada como o resultado final do processo de formulação.

Posteriormente foram desenvolvidos novos procedimentos e equipamentos de compactação em laboratório, que procuram simular a compactação *in situ* (modo e intensidade de compactação). As misturas betuminosas compactadas em laboratório através destes novos procedimentos têm características volumétricas semelhantes às obtidas nos pavimentos e, neste sentido, foi desenvolvido o compactador de corte giratório (equipamento de compactação e ensaio).

Nos **métodos volumétricos** de formulação de misturas betuminosas, a composição das misturas betuminosas é determinada através da análise das proporções volumétricas dos vazios, do betume e dos agregados de misturas betuminosas compactadas, usando o compactador de corte giratório mencionado anteriormente.

Nestes métodos, a composição da mistura betuminosa é obtida com base nas propriedades volumétricas medidas em provetes compactados em laboratório, semelhantes às obtidas para as misturas betuminosas *in situ*, que devem cumprir determinadas exigências especificadas. A principal exigência é a obtenção duma porosidade igual a 4%. As propriedades volumétricas são o volume de vazios dos agregados (VMA), o volume de vazios da mistura betuminosa (VV) e o volume de vazios preenchidos por betume (VPB).

Os métodos de formulação volumétricos devem ser utilizados apenas em estradas com um tráfego pouco intenso. Nesse contexto, não é necessário determinar as propriedades mecânicas das misturas betuminosas, uma vez que o cumprimento das exigências relativas às propriedades volumétricas já garante um adequado desempenho mecânico dessas misturas.

Os métodos volumétricos estão na base dos mais recentes métodos de formulação relacionados com o comportamento ou baseados no comportamento das misturas betuminosas.

Nos últimos anos foram desenvolvidos ensaios fundamentais e de simulação para melhor avaliação do comportamento mecânico das misturas betuminosas *in situ*. Estes métodos são mais realistas porque se baseiam em ensaios de laboratório com melhor correlação com o comportamento verificado *in situ*.

Surgiram então os **métodos relacionados com o comportamento das misturas betuminosas**. A formulação de misturas betuminosas relacionada com o seu comportamento visa a obtenção, através de ensaios mecânicos (fundamentais ou de simulação), da composição que garante determinado nível de comportamento desejado para a mistura betuminosa. Por exemplo, se o comportamento que se espera duma mistura betuminosa é uma boa resistência à fadiga, procura-se obter, através de ensaios, uma composição que garanta que as exigências relativas a esse comportamento da mistura betuminosa sejam alcançadas. Nestes métodos, produzem-se inicialmente misturas betuminosas baseadas na composição volumétrica óptima. Em seguida, estas são ensaiadas através de ensaios fundamentais ou de simulação, que avaliam certas propriedades relacionadas com o comportamento da mistura betuminosa no pavimento. A partir dos resultados destes ensaios, será encontrada a composição óptima da mistura betuminosa: aquela que garante que todas as propriedades de comportamento avaliadas serão superiores a um mínimo desejado ou especificado.

Finalmente, desenvolveram-se para a formulação de misturas betuminosas, **métodos baseados no comportamento das misturas betuminosas**. Com base nas propriedades das misturas betuminosas medidas em ensaios de laboratório e a partir de modelos teóricos de previsão de comportamento, estes métodos de formulação procuram prever o comportamento das misturas betuminosas no pavimento e a evolução da degradação do pavimento ao longo dum período de vida seleccionado, para determinados tipos de estrutura do pavimento, de condições ambientais e de tráfego. Nestes métodos, a mistura betuminosa, inicialmente optimizada através dum dos métodos de formulação anteriormente citados, é avaliada através de ensaios fundamentais ou de simulação, baseados no comportamento das misturas betuminosas em serviço, cujos resultados servem como dados de entrada num sistema informático de avaliação integrado. O sistema informático de avaliação integrado é um programa que utiliza um conjunto de modelos matemáticos interligados para prever o comportamento das misturas betuminosas *in situ* ao longo do tempo e em condições reais de serviço. Nestes sistemas, há uma interacção entre a formulação das misturas e o dimensionamento do pavimento onde estas são utilizadas. Os resultados obtidos a partir do sistema informático permitem concluir se a mistura betuminosa em estudo deve ser aceite ou rejeitada. Os ensaios a realizar para formulação devem permitir obter as propriedades fundamentais das misturas betuminosas e devem simular o seu comportamento no pavimento. As propriedades fundamentais são usadas como dados de entrada num modelo matemático para previsão do comportamento das misturas betuminosas, modelo esse que faz parte dum sistema informático de avaliação integrado.

Os métodos de formulação mais recentes (relacionados com o comportamento ou baseados no comportamento das misturas betuminosas) já não se baseiam na obtenção da composição à qual corresponde um máximo desempenho mecânico da mistura betuminosa (como o método de Marshall), mas pretendem antes assegurar o cumprimento de determinado nível mínimo de comportamento exigido à mistura betuminosa, que depende da função que esta desempenhará no pavimento.

Os métodos de formulação baseados no comportamento das misturas betuminosas foram desenvolvidos nos EUA, no âmbito do programa de investigação SHRP, sendo a formulação SUPERPAVE um exemplo. O método de formulação SUPERPAVE envolve ensaios de avaliação do desempenho e modelos de previsão do desempenho. Os ensaios de avaliação do desempenho que foram desenvolvidos envolvem dois equipamentos novos que são o ensaio de corte (*SUPERPAVE Shear Tester* - SST (figura 6)) e o ensaio de tracção indirecta (*Indirect Tensile Teste* - ITT (figura 7)).



Fig. 6 - Equipamento SST (*SUPERPAVE Shear Tester*) (FONTE: <http://pavementinteractive.org/>)

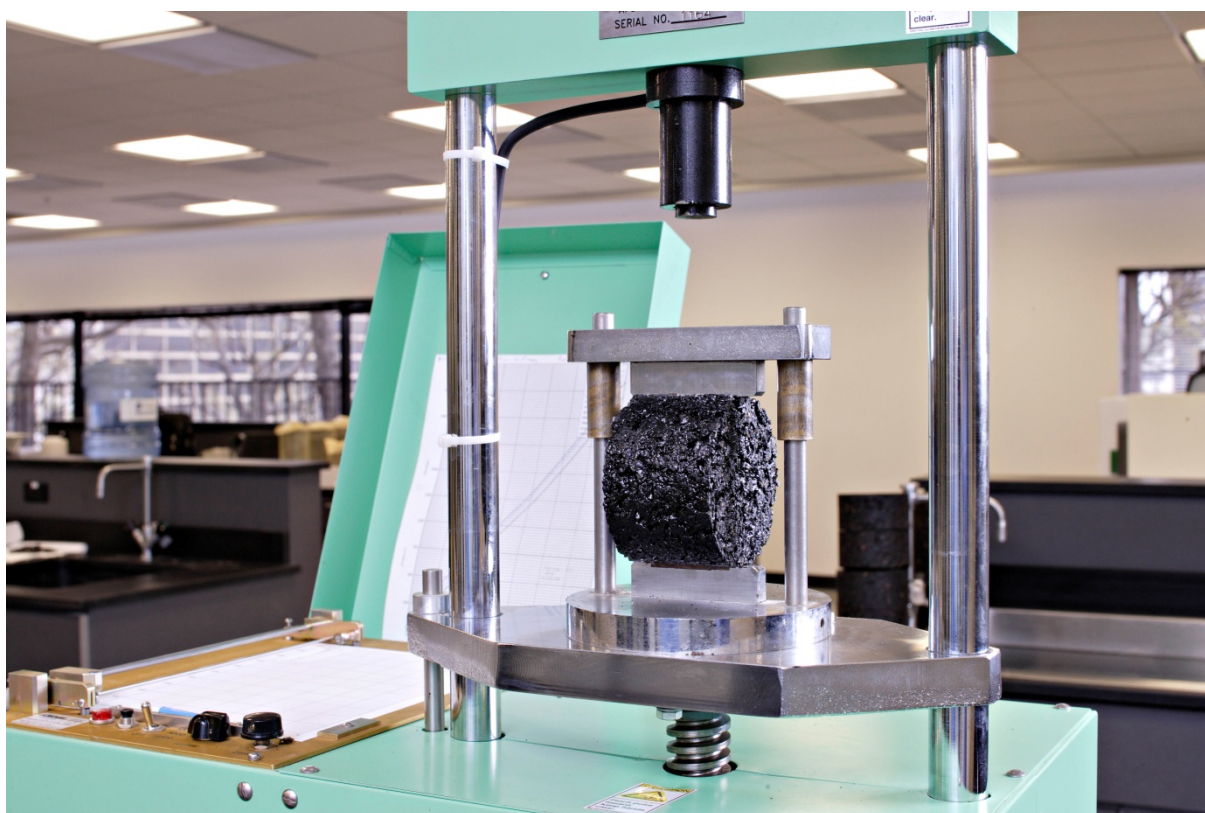


Fig. 7 - Equipamento ITT (*Indirect Tensile Tester*) (FONTE: <http://www.electrical-res.com>)

Nestes equipamentos é possível realizar vários ensaios de acordo com o quadro 3 que se apresenta de seguida.

Quadro 3 - Ensaios a realizar com o equipamento SST e ITT

Equipamento	Ensaio
Equipamento SST (<i>SUPERPAVE Shear Tester</i>)	Ensaio volumétrico
	Ensaio de extensão uniaxial
	Ensaio de corte repetido a taxa de tensão constante
	Ensaio de corte repetido a altura constante
	Ensaio de corte simples a altura constante
	Ensaio de corte a altura constante com varrimento de frequências
Equipamento ITT (<i>Indirect Tensile Tester</i>)	Ensaio de fluência por tracção indirecta
	Ensaio de avaliação da resistência à tracção indirecta

A previsão SUPERPAVE de desempenho é realizada através de um programa informático que utiliza quatro modelos a partir dos resultados obtidos nos ensaios. Esses modelos e os seus objectivos constam do quadro 4.

Quadro 4 - Modelos do método de formulação SUPERPAVE

Modelos	Objectivo
Modelo de propriedades do material	Os resultados dos ensaios de desempenho são utilizados no modelo de propriedades do material para determinar as propriedades não lineares elásticas, visco-elásticas, plásticas e de fractura.
Modelo dos efeitos ambientais	O modelo dos efeitos ambientais calcula a temperatura do material em função da profundidade e das características térmicas dos materiais.
Modelo de resposta do pavimento	O modelo de resposta do pavimento utiliza os resultados dos modelos de propriedades dos materiais e de efeitos ambientais para prever as tensões e extensões utilizando uma abordagem bidimensional e axissimétrica de elementos finitos.
Modelo de degradação do pavimento	Os resultados do modelo de propriedades dos materiais e de resposta do pavimento são utilizados no modelo de degradação do pavimento para prever as deformações permanentes, a fadiga e o fendilhamento a baixas temperaturas.

2.3.2. VANTAGENS E DESVANTAGENS DE CADA MÉTODO DE FORMULAÇÃO

Para uma escolha mais adequada do método de formulação a utilizar em cada caso, é fundamental conhecer as vantagens e desvantagens de cada categoria, onde foram agrupados os métodos de formulação. Assim, no quadro 5 resumem-se as principais vantagens e desvantagens associadas a cada uma das categorias de métodos de formulação apresentadas.

Quadro 5 - Vantagens e desvantagens de cada categoria de métodos de formulação de misturas betuminosas

Métodos de formulação	Vantagens	Desvantagens
Tipo “receita”	<ul style="list-style-type: none"> - facilidade de aplicação; - grande experiência na sua utilização; - baseados em “receitas” que demonstraram um bom comportamento <i>in situ</i>; - há especificações em muitos países, adequadas às condições locais; - aplicados a uma gama variada de misturas; - é fácil especificar os materiais necessários para fabricar a mistura betuminosa; - é mais fácil cumprir exigências do que alterar a composição, com base em ensaios mecânicos; - o controlo das propriedades dos materiais e das misturas também é relativamente fácil. 	<ul style="list-style-type: none"> - aplicam-se apenas em determinadas condições climáticas e para um determinado nível de tráfego; - o comportamento das misturas não depende só da composição, mas de outros factores não definidos; - se um requisito não for cumprido, é impossível saber a sua influência no comportamento da mistura; - os requisitos podem impedir a utilização de material disponível nas proximidades do local da obra; - entre várias “receitas”, é complexo escolher a mais adequada para a formulação a realizar; - é difícil introduzir inovações; - misturas com a mesma “receita” podem ter diferentes propriedades, para materiais de diferentes origens.
Empíricos	<ul style="list-style-type: none"> - baseiam-se em ensaios simples de baixo custo; - não requerem profissionais qualificados; - a enorme quantidade de resultados disponíveis permite definir um critério de qualidade das misturas betuminosas. 	<ul style="list-style-type: none"> - não utilizam ensaios fundamentais que se baseiam no comportamento das misturas em serviço; - ensaios realizados em condições pouco fundamentadas; - não são adequados às novas condições de tráfego; - a produção de provetes em laboratório não simula a compactação que ocorre no pavimento; - não se utilizam em misturas para bases betuminosas; - não se aplicam a misturas abertas ou descontínuas; - estados de tensão instalada no provete mal definidos.
Análíticos	<ul style="list-style-type: none"> - estimam as propriedades das misturas betuminosas através de cálculos analíticos; - determinam o teor em mastique a usar na mistura, evitando o seu excesso ou carência; - reduzem os estudos preliminares que permitem definir as composições de estudo da mistura; - determina-se facilmente a causa duma formulação inadequada. 	<ul style="list-style-type: none"> - obrigam a cálculos laboriosos, o que impede o seu uso prático sem o suporte de programas informáticos; - o recurso a estes métodos, em exclusivo (não sendo realizado nenhum ensaio), não garante um bom comportamento mecânico das misturas betuminosas.

Volumétricos	<ul style="list-style-type: none"> - aplicam-se com relativa facilidade, não tendo particulares exigências e custos de utilização de equipamento e de procedimento; - em relação aos métodos empíricos, dá maiores garantias de que a composição final obtida na formulação terá um bom desempenho em serviço; - o CCG consegue simular adequadamente, em laboratório, a compactação <i>in situ</i>. 	<ul style="list-style-type: none"> - não se medem certas propriedades das misturas relacionadas com o seu comportamento em serviço; - inadequados para condições de tráfego muito intenso; - apenas permitem avaliar a trabalhabilidade e a resistência às deformações permanentes da mistura; - pequenas alterações nos parâmetros do CCG podem originar uma grande diferença de resultados; - não se assegura um bom comportamento das misturas betuminosas apenas através deste método.
Relacionados com o comportamento das misturas betuminosas	<ul style="list-style-type: none"> - permitem comparar as misturas explicitamente, no que respeita aos comportamentos exigidos; - podem simular o estado de tensão e deformação existente no pavimento; - boa correlação entre os resultados medidos em laboratório e, posteriormente, <i>in situ</i>; - estimulam a inovação e o uso de novos materiais. 	<ul style="list-style-type: none"> - a análise crítica e a validação dos resultados estão limitadas à reduzida experiência na sua aplicação; - os custos e o tempo necessário para a realização dos ensaios são elevados; - ensaios realizados em poucos laboratórios; - utilização num reduzido número de pavimentos.
Baseados no comportamento das misturas betuminosas	<ul style="list-style-type: none"> - não é obrigatório que as misturas respeitem os limites volumétricos de composição; - estimula a inovação e o uso de novos materiais; - estima o comportamento da mistura <i>in situ</i> e a evolução da degradação nos pavimentos ao longo do período de vida escolhido. 	<ul style="list-style-type: none"> - complexidade na aplicação do método e no equipamento requerido; - utilização vantajosa apenas em casos muito particulares; - os custos associados à formulação são elevados; - ainda não se comprovou a sua eficácia.

Cada método de formulação deve ser utilizado criteriosamente, em função: da normalização existente a nível nacional, da importância da obra a realizar, da experiência do responsável pela formulação, e dos equipamentos disponíveis para executar os ensaios.

Em princípio, deve utilizar-se um método de formulação que conduza à obtenção de uma mistura betuminosa com um comportamento otimizado em relação a determinadas características, escolhidas com base nas principais funções que a mistura desempenhará no pavimento.

Para pavimentos submetidos a um tráfego pouco intenso, as exigências em relação ao comportamento das misturas betuminosas são menores. Neste contexto, a relação custo/qualidade aconselha a utilização de métodos de formulação menos complexos (tipo “receita”, empíricos, analíticos e volumétricos), sem estar comprometido o desempenho da mistura betuminosa no pavimento.

A nível económico, deve colocar-se a questão se o investimento inicial na formulação compensa as suas vantagens, nomeadamente:

- um melhor conhecimento de algumas das suas características (resistência à fadiga e às deformações permanentes, e módulo de rigidez), para permitir um melhor e mais correcto dimensionamento do pavimento;
- uma melhoria no desempenho da mistura betuminosa.

2.4. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS BETUMINOSAS - ENSAIO MARSHALL

Por ser o ensaio de caracterização de misturas betuminosas mais utilizado actualmente em Portugal, descreve-se em seguida o ensaio Marshall cujos procedimentos estão especificados pela norma europeia EN 12697-34 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Marshall Test*).

A norma EN 12697-34 define um método de ensaio para determinação da estabilidade, deformação e quociente Marshall de provetes de misturas betuminosas, produzidas em conformidade com a EN 12697-35 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Laboratory mixing*) e preparadas com o compactador de impacto segundo o método de ensaio definido na EN 12697-30 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Specimen preparation, impact compactor*).

Este ensaio tem como princípio a preparação dos provetes Marshall compactados em conformidade com a EN12697-30, e posteriormente a determinação da estabilidade, deformação e quociente Marshall nestes provetes utilizando os métodos estabelecidos e registados conjuntamente com a massa volúmica do provete.

Para a realização deste ensaio torna-se necessário conhecer os seguintes termos e definições:

- *Estabilidade (S)* - Resistência máxima à deformação, em kilonewtons (kN), de um provete moldado de mistura betuminosa.
- *Deformação (F)* - Diferença em milímetros (mm) entre a deformação na rotura do provete e a deformação obtida extrapolando até zero a tangente do gráfico da carga função da deformação.
- *Deformação tangencial (Ft)* - Diferença em milímetros (mm) entre a deformação do provete obtida por extrapolação da tangente do gráfico da carga função da deformação até à força de rotura e a deformação obtida por extrapolação da tangente até ao valor zero da carga.
- *Quociente Marshall (S/F)* - Rácio da estabilidade, S, à deformação, F.

Preparação dos provetes

Os provetes deverão ser compactados em conformidade com a EN12697-30 por forma a que sejam aplicadas 50 pancadas em cada face do provete com o compactador Marshall (Figura 8-a), dentro do intervalo de variação da temperatura definido.

Os provetes compactados devem ser retirados dos moldes e arrefecidos ao ar por forma a evitar qualquer deformação. Após desmoldagem esperar pelo menos 4h antes de se darem início aos ensaios. Todos os ensaios devem ser completados até 32h após a desmoldagem. A baridade de cada provete deve ser determinada em conformidade com a EN 12697-6.

A altura de cada provete deve ser medida em conformidade com a EN 12697-29, ou calcular o volume com base na medição da baridade.

Mergulhar os provetes cilíndricos, sobre uma superfície lisa, no banho-maria durante pelo menos 40 min. e não excedendo os 60 min., manter a temperatura da água do banho-maria a $(60 \pm 1) ^\circ\text{C}$.

Procedimento de ensaio

Limpar cuidadosamente os eixos guia e as superfícies internas do estabilómetro Marshall (Figura 8-b). Lubrificar os eixos guia de forma a assegurar que a peça superior do estabilómetro Marshall deslize livremente sobre estes.

Preparar o estabilómetro Marshall pré-aquecendo-o durante pelo menos 30 min. a $(60 \pm 1) ^\circ\text{C}$ no banho-maria ou durante uma hora na estufa. Esta acção deve ser efectuada no início de cada ensaio que envolva um lote de provetes não superior a 12, em número. No caso de um atraso superior a 3 min. entre ensaios consecutivos de dois provetes, o estabilómetro Marshall deverá ser aquecido numa estufa

adequada ou num banho-maria mantido à temperatura de ensaio. O período mínimo de reaquecimento deve ser igual ao menor atraso verificado acrescido de 30 minutos quando aquecido num banho de água, ou o dobro deste quando aquecido num forno.

Remover o provete de ensaio do banho-maria e colocá-lo de lado no centro do estabilómetro Marshall por forma a assegurar um bom contacto da superfície do provete com a superfície do estabilómetro.

Colocar o conjunto no centro da máquina de ensaio. Antes da execução do ensaio em cada um dos provetes, o estabilómetro Marshall deve ser limpo conforme estabelecido. Poderá ser utilizado um solvente ambientalmente adequado para limpeza devendo ser aplicado um spray de silicone para evitar a adesão dos provetes à superfície de contacto do estabilómetro Marshall.

Aplicar a carga ao provete de ensaio de forma a atingir-se uma taxa de deformação constante de (50 ± 2) mm/min tendo em consideração o período de transição. Manter a aplicação desta carga até ser obtida a leitura máxima no dispositivo de medição de cargas. Registar a carga indicada. Esta fase do ensaio deve ser executada dentro de 40s após a remoção do provete do banho-maria. Medir também a distância, a partir da intersecção da tangente e a linha de base, A , até ao ponto em que é atingida a carga máxima, M .

Executar os ensaios de estabilidade e de deformação num grupo de pelo menos quatro provetes.



a)



b)

Fig. 8 – (a) Compactador Marshall; (b) Estabilómetro Marshall

2.5. MARCAÇÃO CE EM MISTURAS BETUMINOSAS

Tendo em vista a supressão de barreiras técnicas que permitam a comercialização dos produtos no seio da comunidade Europeia o Conselho das Comunidades Europeias adoptou a Directiva nº 89/106/CEE, de 21 de Dezembro de 1988, vulgarmente designada por Directiva dos Produtos de Construção. Esta Directiva foi alterada pelas Directiva 93/68/CEE, em 22 de Junho de 2003. A transposição destas directivas para o direito nacional foi realizada através do Decreto-Lei nº 113/93, de 10 de Abril de 1993.

A Directiva dos Produtos de Construção estabelece, em linhas gerais, que os produtos de construção comercializados na Comunidade Europeia, quer sejam os empreendimentos de construção ou os materiais e sistemas neles incorporados, devem ser concebidos e realizados de forma a satisfazer certas condições reputadas de interesse público. Essas condições, consideradas como requisitos essenciais são: resistência mecânica e estabilidade; segurança contra incêndios; higiene, saúde e ambiente; segurança na utilização; protecção contra o ruído e economia de energia e retenção de calor.

A marcação CE consiste num instrumento de regulação da livre comercialização de produtos na Comunidade Europeia e exprime, por declaração do industrial, com ou sem intervenção de uma entidade certificadora, o cumprimento das directivas comunitárias aplicáveis.

A Directiva dos Produtos de Construção implica a necessidade de dar cumprimento às normas europeias que especificam os produtos e que materializam a satisfação desses requisitos essenciais, normas estas que se designam por “normas harmonizadas”, bem como a adopção de todas as normas de ensaio que lhes estão associadas.

As misturas betuminosas encontram-se ao abrigo desta directiva, visto que são produtos de construção, em particular, produtos para construção de estradas. Deste modo, com a existência de “normas harmonizadas” relativas a misturas betuminosas, estas encontram-se em condições de responder a esta directiva cumprindo os requisitos nelas especificados. Sendo assim, a partir daqui, as organizações têm de tomar medidas no sentido de rapidamente cumprir os requisitos aplicáveis e proceder à marcação do produto. A marcação CE atesta a adequação dos produtos as exigências das directivas comunitárias de forma a permitir a sua livre circulação no interior do mercado.

No caso das misturas betuminosas, os elementos normativos distinguem-se em várias vertentes específicas, sendo que neste trabalho se vai dar especial destaque às normas de produto (EN 13108) e normas de ensaio (EN 12697). A série de normas EN 13108 (*Bituminous mixtures – Material Specifications*) é composta por diversas partes e integra as especificações para diversos tipos de misturas betuminosas bem como as especificações relativas ao controlo de produção em fábrica e ensaios de tipo a realizar. Cada parte da norma EN 13108 correspondente a um tipo de mistura betuminosa é composta por requisitos gerais, requisitos empíricos e requisitos fundamentais ou racionais. Esses requisitos correspondentes às propriedades da mistura betuminosa são divididos em classes de acordo com os valores das propriedades em causa. O quadro 6 apresenta as diferentes partes desta norma.

Quadro 6 - Partes constituintes da EN 13108

Parte	Título
Parte 1	Asphalt concrete
Parte 2	Asphalt concrete for very thin layers
Parte 3	Soft asphalt
Parte 4	Hot rolled asphalt
Parte 5	Stone mastic asphalt
Parte 6	Mastic asphalt
Parte 7	Porous asphalt
Parte 8	Reclaimed asphalt
Parte 20	Type testing
Parte 21	Factory production control

A série de normas EN 12697 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt*) subdivide-se em 47 partes que integram os diversos métodos de ensaio para misturas betuminosas. Relativamente a esta série de normas, a sua apresentação e análise será feita mais adiante no capítulo 3 da presente dissertação.

Assim, como já havia acontecido para os agregados e ligantes betuminosos nos finais dos anos 90, a partir de 1 de Março de 2008, entrou em vigor a obrigatoriedade da marcação CE em misturas betuminosas.

Em Portugal os organismos responsáveis pela Marcação CE são:

- Instituto Português da Qualidade (IPQ);
- Organismo de Normalização Sectorial (ONS);
- Comissões técnicas de normalização (CNQ 2/99).

Embora seja uma imposição legal, a marcação CE em misturas betuminosas apresenta algumas vantagens que tornaram positivo este processo de implementação, entre as quais:

- Melhor qualidade do produto;
- Melhor rastreabilidade do produto;
- Maior fiabilidade do produto;
- Aumento da competitividade da empresa fabricante.

3

ANÁLISE DAS NORMAS EN 12697: MÉTODOS DE ENSAIO PARA MISTURAS BETUMINOSAS A QUENTE

3.1. ENQUADRAMENTO

A série de normas EN 12697 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt*) está directamente associada ao conjunto de “normas harmonizadas” que materializam a satisfação dos requisitos essenciais à marcação CE em misturas betuminosas. Estas normas integram os métodos de ensaio referentes a misturas betuminosas.

Desenvolvidas pela Comissão Técnica Europeia CEN/TC227 “Road Materials” e sob a coordenação do DIN (Instituto Alemão de Normalização), este conjunto de normas tem vindo a ser gradualmente adoptadas como normas nacionais. De forma a introduzir estas normas no panorama normativo português, foi criada pelo ONS-EP (Organismo de Normalização Sectorial – Estradas de Portugal) uma comissão técnica (CT) para o desenvolvimento da actividade normativa no domínio dos materiais para pavimentação. Criada em 16 de Janeiro de 2007, a CT 129 torna-se então responsável por acompanhar a actividade normativa desenvolvida pela Comissão Técnica Europeia CEN/TC 227 “Road Materials”, tendo como objectivo a elaboração de Normas Portuguesas e respectivos anexos nacionais, documentos normativos, entre os quais especificações técnicas, e a emissão de pareceres normativos no domínio dos materiais para pavimentação. Actualmente a sua coordenação é da responsabilidade do ONS-InIR (Organismo de Normalização Sectorial – Instituto de Infra-estruturas Rodoviárias).

As Comissões Técnicas desenvolvem normalmente os seus trabalhos em reuniões, podendo organizar-se em Sub-Comissões (SC) e/ou Grupos de Trabalho (GT), de acordo com o seu âmbito de actividades e o programa de trabalhos que pretendem realizar. Nas reuniões das CT participam diversas entidades representadas pelos respectivos Vogais nomeados para o efeito.

A estrutura da CT 129 inclui cinco Sub-Comissões (SC) com as seguintes designações: SC1 - Especificações para materiais com ligantes betuminosos, SC2 - Métodos de ensaio para materiais com ligantes betuminosos, SC3 - Materiais para pavimentos em betão, SC4 - Misturas de agregados não ligados ou ligados hidraulicamente, SC5 - Características de superfície.

A SC2, como responsável pela actividade normativa no âmbito dos métodos de ensaio para materiais com ligantes betuminosos, tem sob sua alçada a série de normas EN 12697 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt*) que será analisada na presente dissertação.

3.2. APRESENTAÇÃO DAS NORMAS

Elaboradas pela Comissão Técnica CEN/TC227 “Road Materials”, a série de normas EN 12697 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt*) é composta actualmente por 47 partes e integra os mais diversos métodos de ensaio para misturas betuminosas. No quadro 7 apresentam-se as partes constituintes desta série de normas.

Quadro 7 - Partes constituintes da EN 12697

Parte	Título
Parte 1	Soluble binder content
Parte 2	Determination of particle size
Parte 3	Bitumen recovery: Rotary distribution
Parte 4	Bitumen recovery: Fractioning column
Parte 5	Determination of the maximum density
Parte 6	Determination of bulk density of bituminous specimens
Parte 7	Determination of bulk density of bituminous specimens by gamma rays
Parte 8	Determination of void characteristics of bituminous specimens
Parte 9	Determination of the reference density
Parte 10	Compactibility
Parte 11	Determination of the affinity between aggregates and bitumen
Parte 12	Determination of the water sensitivity of bituminous specimens
Parte 13	Temperature measurement
Parte 14	Water content
Parte 15	Determination of the segregation sensitivity
Parte 16	Abrasion by studded tyres
Parte 17	Particle loss of porous asphalt specimen
Parte 18	Binder drainage from porous asphalt
Parte 19	Permeability of specimen
Parte 20	Indentation using cube or Marshall specimen
Parte 21	Indentation using plate specimens
Parte 22	Wheel tracking
Parte 23	Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens
Parte 24	Resistance to fatigue
Parte 25	Cyclic compression test
Parte 26	Stiffness
Parte 27	Sampling

Parte 28	Preparation of samples for determining binder content, water content and grading
Parte 29	Determination of the dimensions of a bituminous specimen
Parte 30	Specimen preparation, impact compactor
Parte 31	Specimen preparation, gyratory compactor
Parte 32	Laboratory compaction of bituminous mixtures by vibratory compactor
Parte 33	Specimen prepared by roller compactor
Parte 34	Marshall test
Parte 35	Laboratory mixing
Parte 36	Determination of the thickness of a bituminous pavement
Parte 37	Hot sand test for the adhesivity of binder on pre-coated chippings for HRA
Parte 38	Test equipment and calibration
Parte 39	Binder content by ignition
Parte 40	In-situ drainability
Parte 41	Resistance to deicing fluids
Parte 42	Amount of foreign matter in reclaimed asphalt
Parte 43	Resistance to fuel
Parte 44	Crack propagation by semi-circular bending test
Parte 45	Saturation ageing tensile stiffness (SATS) conditioning test
Parte 46	Low temperature cracking and properties
Parte 47	Determination of the ash content of Lake Asphalt

As partes 44, 45, 46 e 47 da norma EN 12697 ainda se encontram em desenvolvimento pela Comissão Técnica CEN/TC227 “Road Materials”, no entanto, foram apresentadas no quadro 7 devido ao facto de já existir um projecto de norma em fase de aprovação para cada uma destas partes mencionadas.

Muitas destas normas referidas na lista apresentada anteriormente, ainda se encontram em processo de estudo pela comissão técnica responsável, com vista a serem adoptadas como normas nacionais.

A SC2 ao desenvolver a sua actividade normativa adoptou algumas destas normas como sendo prioritárias. A prioridade foi definida pela importância da norma, tendo em conta a tradição nacional em termos de formulação de misturas betuminosas e o grau de proximidade com os métodos de ensaio referidos nas normas caducadas. Sendo assim, as partes da norma EN 12697 que foram adoptadas prioritariamente como normas nacionais são aquelas relacionadas com a preparação das amostras de ensaio (partes 27, 35, 30, 31, 32) e com a caracterização volumétrica das misturas betuminosas (partes 5, 6, 8, 9), pois são indispensáveis; e também as relacionadas com os principais ensaios empíricos (partes 34, 22), pois actualmente em Portugal a formulação de misturas betuminosas ainda é muito baseada numa abordagem empírica.

3.3. ORGANIZAÇÃO TEMÁTICA DAS NORMAS

Constituída por 47 partes, a série de normas EN 12697 apresenta uma dimensão considerável. Com vista a facilitar a análise desta série de normas, optou-se então por agrupar as partes constituintes da norma EN 12697 em vários grupos fictícios de normas, que serão certamente uma mais-valia para o estudo e aplicação destas normas europeias. Esta sub-divisão visa sobretudo dar uma visão geral dos métodos de ensaio para misturas betuminosas, enquadrando-os em grupos que identificam características e requisitos para as misturas betuminosas.

O agrupamento das normas EN 12697 proposto na presente dissertação baseia-se fundamentalmente no acompanhamento do especificado na norma NP EN 13108-20 (*Misturas betuminosas. Especificações dos materiais. Parte 20: Ensaio de tipo*) que é parte integrante do sistema de avaliação da conformidade das misturas betuminosas, juntamente com as normas de produto EN 13108-1 a 8, que definem os requisitos para as misturas betuminosas a quente, fazendo a sua correspondência com os métodos de ensaio para misturas betuminosas. Esta correspondência não será linear certamente, e terá em conta uma visão pessoal decorrente do estudo destas séries de normas.

De forma a simplificar este processo de divisão de normas, optou-se por ter em consideração apenas a norma de produto NP EN 13108-1 (*Misturas betuminosas. Especificações dos materiais. Parte 1: Betão betuminoso*), visto que esta cobre a maioria das misturas betuminosas aplicadas em Portugal e contém um anexo nacional que refere as características e requisitos para as misturas betuminosas. Poderia ser efectuada a mesma análise para as restantes normas do produto, mas devido às razões mencionadas, considera-se esta forma de abordagem suficiente e não muito restritiva no âmbito do objectivo desta dissertação.

Sendo assim, esta organização das normas de ensaio de misturas betuminosas será efectuada primeiramente fazendo a correspondência (não linear) entre as normas EN 13108-20, EN 13108-1 e a série de normas de ensaios EN12697. Assume extrema importância nesta análise o anexo nacional constituinte da norma NP EN 13108-1, anexo de carácter informativo que tem como principal objectivo efectuar recomendações aos utilizadores desta norma sobre as opções a tomar, de acordo com a experiência nacional, para declarar a conformidade das misturas betuminosas com os requisitos constantes da NP EN 13108-1. Igualmente, este anexo estabelece a relação entre as versões portuguesas das normas europeias EN 13108-1, EN 13108-20 e EN 13108-21.

Desta análise resultam os 3 principais grupos de normas de ensaio, que traduzem aproximadamente o especificado no Quadro 4 (Características e requisitos para as misturas betuminosas) do anexo nacional constituinte da norma NP EN 13108-1. Surgem então os seguintes grupos de normas de ensaio para misturas betuminosas:

- Características dos materiais constituintes;
- Requisitos gerais;
- Requisitos empíricos.

A norma NP EN 13108-1 prevê dois tipos de abordagem para definir o betão betuminoso: abordagem empírica e abordagem fundamental. De acordo com o estipulado nesta norma europeia o objectivo final é o de especificar o betão betuminoso em termos de propriedades fundamentais baseadas no desempenho. No entanto, dadas as diferenças de conhecimento e de experiência no espaço comunitário europeu relativamente às especificações baseadas numa abordagem fundamental para este tipo de mistura betuminosa, é incluída a abordagem empírica. Assim, os países com menos experiência na abordagem fundamental podem optar, numa primeira fase, pela abordagem empírica e

irem adquirindo experiência nos ensaios baseados no desempenho, de forma a enveredar pelo uso cada vez mais generalizado da abordagem fundamental para especificar o betão betuminoso. Dado o actual estado da arte em Portugal, o anexo nacional mencionado recomenda a especificação do betão betuminoso com base na abordagem empírica, prevendo-se, no entanto, que Portugal adquira brevemente experiência na abordagem fundamental.

Assim sendo, no âmbito da presente dissertação optou-se por incluir um grupo de normas relativo a requisitos fundamentais das misturas betuminosas, que embora não conste no anexo nacional, é o futuro previsível para a formulação de misturas betuminosas e é importante ser incluído neste estudo. Deste modo, define-se um quarto grupo de normas que se denomina: Requisitos fundamentais.

Definidos que estão os principais quatro grupos de normas a considerar nesta análise, existem ainda outras normas da série EN 12697 que podem ser agrupadas tematicamente. Portanto adoptaram-se mais dois grupos de normas de acordo com o conhecimento pessoal adquirido no estudo destes documentos normativos. Estes grupos são: Preparação de amostras e Compactação.

Apresenta-se no quadro 8, os grupos de normas resultantes desta organização temática e o respectivo âmbito de aplicação das normas que os constituem.

Quadro 8 - Grupos de normas e respectivo âmbito de aplicação das partes constituintes

Grupo de normas	Âmbito de aplicação das partes constituintes
Características dos materiais constituintes	Normas de ensaio referentes à caracterização dos materiais constituintes das misturas betuminosas (ligantes, agregados, aditivos, misturas betuminosas recuperadas)
Requisitos gerais	Normas de ensaio referentes aos requisitos gerais das misturas betuminosas de acordo com a norma EN 13108-1 (Anexo Nacional)
Requisitos empíricos	Normas de ensaio referentes aos requisitos empíricos das misturas betuminosas de acordo com a norma EN 13108-1 (Anexo Nacional)
Requisitos fundamentais	Normas de ensaio referentes aos requisitos fundamentais das misturas betuminosas de acordo com a norma EN 13108-1
Preparação de amostras	Normas de ensaio referentes aos processos de preparação das amostras de misturas betuminosas e de determinação das suas dimensões
Compactação	Normas de ensaio referentes aos diversos métodos de compactação de misturas betuminosas com os diferentes equipamentos

Apresenta-se seguidamente a constituição dos diversos grupos de normas, indicando o objectivo referente a cada um dos métodos de ensaio da série de normas EN 12697 integrantes de cada um dos grupos definidos.

3.3.1. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS CONSTITUINTES

Baseado na análise da norma EN 13108-1 (Anexo Nacional), este grupo de normas contém todas as partes da série de normas EN 12697 relacionadas com a caracterização dos materiais constituintes das misturas betuminosas.

A norma EN 13108-1 (Secção 4) define os requisitos para os materiais constituintes das misturas betuminosas. O ligante, o agregado, os aditivos e as misturas betuminosas recuperadas são materiais constituintes de misturas betuminosas, mas para tal necessitam de ter conformidade aprovada de acordo com as normas ou especificações técnicas referentes a cada um destes materiais. Por exemplo, os agregados devem estar em conformidade com a norma europeia EN 13043 (*Aggregates for bituminous mixtures and surface treatments for roads, airfields and other trafficked areas*) e o betume de acordo com a EN 12591 (*Bitumen and bituminous binders – Specifications for paving grade bitumens*). No entanto para complementar a caracterização e aprovar a adequação destes materiais para a composição de misturas betuminosas, os materiais constituintes das misturas betuminosas devem estar em conformidade com algumas normas da série EN 12697.

As normas que constituem o presente grupo e que se passarão a descrever de seguida são as seguintes:

- EN 12697-1 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Soluble binder content*)
- EN 12697-2 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Determination of particle size*)
- EN 12697-3 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Bitumen recovery: Rotary distribution*)
- EN 12697-4 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Bitumen recovery: Fractioning column*)
- EN 12697-39 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Binder content by ignition*)

EN 12697-1 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Soluble binder content*)

Esta norma define os métodos de ensaio para determinação do teor em ligante solúvel de amostras de misturas betuminosas. Os métodos de ensaio nela descritos são adequados para efeitos de controlo de qualidade durante a produção da mistura em fábrica e para verificação da conformidade com as normas do produto.

O método de determinação do teor em ligante solúvel comporta várias operações básicas: a extracção do ligante pela sua dissolução em quente ou frio, a separação da matéria mineral da solução de ligante, a determinação da quantidade de ligante pela diferença ou recuperação do ligante e o cálculo propriamente dito do teor em ligante solúvel. Para cada uma destas operações básicas que constituem o ensaio de determinação do teor em ligante solúvel de uma mistura betuminosa, esta norma propõe vários métodos e equipamentos diferentes adequados às mais diversas situações. Os métodos mais apropriados à realização do ensaio devem ser seleccionados pelos responsáveis pela execução do ensaio, ou poderão ainda ser impostos por cadernos de encargos ou outras especificações.

EN 12697-2 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Determination of particle size*)

Esta norma define um procedimento para a determinação da distribuição granulométrica dos agregados de misturas betuminosas por peneiração e pesagem. Este ensaio pode ser realizado após a realização do método de extracção do ligante segundo a norma EN 12697-1. Esta norma tem como principal referência a norma NP EN 933 (*Ensaaios para determinação das características geométricas de materiais granulares*) e a sua aplicabilidade é descrita nas normas de produto referentes às misturas betuminosas.

EN 12697-3 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Bitumen recovery: Rotary distribution*)

Esta norma define um método de ensaio para a recuperação do betume solúvel a partir de materiais betuminosos de pavimentação, de forma adequada para serem submetidos a ensaios. O betume é separado da amostra através da sua dissolução com um solvente apropriado. Após a remoção dos sólidos não dissolvidos da solução de betume, o betume é recuperado desta solução através de um processo de destilação sob vácuo efectuada com o auxílio de um evaporador rotativo.

O procedimento descrito nesta norma é aplicável apenas à recuperação de betumes destinados a pavimentação.

EN 12697-4 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Bitumen recovery: Fractioning column*)

Esta norma define um método de ensaio para a recuperação do betume solúvel a partir de materiais betuminosos de pavimentação, de forma adequada para serem submetidos a ensaios. O procedimento é adequado para a recuperação do pavimento betuminoso e também é adequado para as misturas contendo matérias voláteis, tais como betume modificado, mas os resultados podem ser menos precisos.

Esta Norma Europeia é o método de referência para as misturas que contêm matérias voláteis.

EN 12697-39 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Binder content by ignition*)

Esta norma descreve o método de ensaio para determinação da percentagem de betume de amostras de misturas betuminosas, por incineração. Como tal, é uma alternativa ao método mais tradicional de extracção de betume utilizando solventes. O método pode ser usado para efectuar a avaliação da composição da mistura, uma vez que os agregados remanescentes podem ser utilizados na determinação da análise granulométrica e a massa volúmica indica se existiu uma excessiva alteração das partículas de agregados à temperatura atingida no ensaio. No entanto, a necessidade de calibração da mistura, ou dos seus componentes, antes que se possa efectuar qualquer análise, faz com que o método seja de fácil utilização em misturas de utilização frequente, preferivelmente a situações de realização de diferentes tipos de misturas com diversas proveniências de agregados. Este método de ensaio é igualmente adequado para a análise de misturas que utilizam betumes modificados ou não modificados porque o método exige a calibração de cada mistura a ensaiar quando é utilizada a calibração nas misturas.

3.3.2. REQUISITOS GERAIS

Baseado na análise da norma EN 13108-1 (Anexo Nacional), este grupo de normas contém todas as partes da série de normas EN 12697 utilizadas para a determinação dos requisitos gerais que as misturas betuminosas devem satisfazer.

A norma EN 13108-1 (secção 5.2.) define os requisitos gerais a satisfazer pela mistura betuminosa. Composição e granulometria, porosidade, revestimento e homogeneidade, sensibilidade à água, resistência à abrasão provocada por pneus pitonados, resistência à deformação permanente, reacção ao fogo, resistência aos combustíveis para aplicação em aeroportos, resistência aos fluidos descongelantes para aplicação em aeroportos, temperatura da mistura e durabilidade são os requisitos gerais a que deve satisfazer a mistura betuminosa de acordo com a norma EN 13108-1. Contudo, no anexo nacional, a referida norma selecciona apenas os requisitos de composição e granulometria, porosidade, sensibilidade à água, resistência à deformação permanente e a temperatura de fabrico.

A mistura betuminosa, para além dos requisitos gerais mencionados anteriormente, deve satisfazer também os requisitos para os materiais constituintes, de acordo com a sub-secção 3.3.1. deste trabalho.

A cada um dos requisitos gerais citados está associado um, ou mais, métodos de ensaio segundo a série de normas EN 12697, que permite caracterizar esse requisito. Deste modo, agruparam-se as partes da série de normas EN 12697 referentes aos métodos de ensaio utilizados na determinação das características que definem os requisitos gerais da mistura betuminosa.

As normas que constituem o presente grupo e que se passarão a descrever de seguida são as seguintes:

- EN 12697-5 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt -Determination of the maximum density*)
- EN 12697-6 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Determination of bulk density of bituminous specimens*)
- EN 12697-8 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Determination of void characteristics of bituminous specimens*)
- EN 12697-12 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Determination of the water sensivity of bituminous specimens*)
- EN 12697-13 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Temperature measurement*)
- EN 12697-16 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Abrasion by studded tyres*)
- EN 12697-41 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Resistance to deicing fluids*)
- EN 12697-43 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Resistance to fuel*)

EN 12697-5 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt -Determination of the maximum density*)

A presente norma especifica métodos de ensaio para determinação da baridade máxima teórica de uma mistura betuminosa (isenta de vazios). Especifica um procedimento volumétrico, um procedimento hidrostático e um procedimento matemático. No procedimento volumétrico, o volume da amostra é determinado através do volume de água ou de solvente deslocado pela amostra dentro de um picnómetro. No procedimento hidrostático, o volume da amostra é calculado a partir da massa seca da amostra e da sua massa quando imersa em água. No procedimento matemático, a baridade máxima teórica de uma mistura betuminosa é calculada a partir da sua composição e das massas volúmicas dos

seus constituintes. Relativamente à escolha do método mais apropriado para o cálculo da massa volúmica de uma mistura betuminosa, esta norma fornece todas as indicações necessárias.

A baridade máxima teórica, conjuntamente com a baridade, é utilizada para calcular a porosidade e outras propriedades volumétricas de uma mistura betuminosa compactada.

Os métodos de ensaio descritos nesta norma destinam-se a ser utilizados com misturas betuminosas desagregadas que contenham betumes de pavimentação, betumes modificados ou outros ligantes betuminosos utilizados para misturas betuminosas a quente. Os ensaios são aplicáveis às misturas betuminosas novas ou envelhecidas.

EN 12697-6 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Determination of bulk density of bituminous specimens*)

Esta norma define os métodos de ensaio para determinação da baridade de um provete betuminoso compactado. Esta norma descreve os quatro seguintes métodos, cuja escolha depende do teor calculado e da acessibilidade de vazios no provete: massa volúmica - seca (para provetes com superfície muito fechada); massa volúmica - superfície saturada seca (para provetes com uma superfície fechada); massa volúmica - provete selado (para provetes com uma superfície aberta ou grosseira); massa volúmica por dimensões (para provetes com uma superfície homogénea e com formas geométricas, ou seja, quadrados, rectângulos, cilindros, ...). Fornece recomendações gerais relativas à escolha do método mais apropriado.

Os métodos de ensaio descritos nesta norma são aplicáveis à utilização de provetes compactados fabricados em laboratório ou de tarolos retirados do pavimento após colocação e compactação.

EN 12697-8 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Determination of void characteristics of bituminous specimens*)

Esta norma define um procedimento para o cálculo de duas características volumétricas de um provete betuminoso compactado: a porosidade (V_m) e a percentagem de vazios no agregado mineral preenchidos com ligante (VFB). A porosidade de um provete betuminoso é calculada utilizando a baridade máxima teórica da mistura e da baridade do provete. A percentagem de vazios no agregado mineral de um provete betuminoso preenchido com betume é calculada a partir da percentagem de ligante, dos vazios do agregado mineral, da baridade do provete e da massa volúmica do ligante. Estas características volumétricas podem ser utilizadas como critério de formulação das misturas ou como parâmetros da sua avaliação após colocação e compactação nos pavimentos

Este método é adequado para provetes preparados em laboratório ou obtidos por carotagem após colocação e compactação da mistura no pavimento.

EN 12697-12 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Determination of the water sensitivity of bituminous specimens*)

Esta norma define um método de ensaio para determinação do efeito da saturação acelerado em água na resistência à tracção indirecta de provetes cilíndricos de misturas betuminosas.

Neste ensaio um grupo de provetes cilíndricos é dividido em dois subgrupos de dimensões idênticas. Um dos subgrupos é mantido seco à temperatura ambiente, enquanto o outro subgrupo é saturado e armazenado em água a uma temperatura elevada. De seguida, a resistência à tracção indirecta de cada um dos subgrupos é determinada em conformidade com a norma europeia EN 12697-23 à temperatura

de ensaio especificada. Procede-se à determinação da resistência conservada em tracção indirecta através do quociente entre a resistência do subgrupo condicionado em água e resistência do subgrupo seco, expressa em termos de percentagem.

Este método pode ser utilizado para avaliação do efeito da humidade com ou sem a integração de aditivos para melhoria da adesividade, incluindo líquidos, tais como aminas, e fílers, tais como cal hidratada ou cimento.

EN 12697-13 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Temperature measurement*)

Esta norma descreve um método de ensaio para medição da temperatura das misturas betuminosas a quente após mistura, durante o armazenamento, transporte e colocação.

Neste ensaio, uma sonda é conectada a um dispositivo de medição de temperatura. É medida a temperatura em várias posições de profundidade na mistura betuminosa, e finalmente é calculada a média das temperaturas.

EN 12697-16 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Abrasion by studded tyres*)

Esta norma descreve dois métodos de ensaio para determinação da abrasão provocada por pneus pitonados, testado em provetes cilíndricos de misturas betuminosas.

No primeiro método, uma amostra cilíndrica de diâmetro de 100 mm e comprimento de 30 mm, é levada a uma temperatura de 5°C. De seguida é sujeita a uma acção abrasiva durante 15 min por 40 esferas de aço. A perda de volume é registada e é reportada como o valor de abrasão.

No segundo método, uma amostra cilíndrica de diâmetro de 100 mm e comprimento de pelo menos 45 mm, é levada a uma temperatura de 5°C. De seguida a amostra é desgastada e molhada por três pneus com pregos, durante 2 h. A perda de volume é registada e é reportada como o valor da abrasão.

EN 12697-41 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Resistance to deicing fluids*)

Esta norma descreve um método de ensaio para determinar a resistência de materiais betuminosos aos fluidos do degelo, como soluções de acetato, formiato e uréia. O procedimento determina a força de tracção de um provete de mistura betuminosa após armazenamento em fluidos de degelo, e destina-se a misturas betuminosas densas, como o betão betuminoso, e não é apropriado para misturas betuminosas abertas, como misturas betuminosas porosas. Portanto, esta norma não se aplica às misturas contendo mais de 8,0% de vazios.

Esta norma é usada principalmente como método de ensaio para misturas betuminosas a aplicar em aeródromos, contudo, pode ser aplicada a misturas betuminosas para aplicação em estradas ou outras áreas pavimentadas.

EN 12697-43 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Resistance to fuel*)

Esta norma especifica um método de ensaio para determinar a resistência de uma mistura betuminosa ou pavimento aos combustíveis. O processo inicial envolve a imersão num combustível de uma amostra de teste feita em laboratório ou retirada do pavimento, seguido por um período em que se escovará com uma escova de aço apropriada para o efeito. A perda de material da amostra é uma medida da resistência da mistura betuminosa em relação ao combustível.

3.3.3. REQUISITOS EMPÍRICOS

Baseado na análise da norma EN 13108-1 (Anexo Nacional), este grupo de normas contém todas as partes da série de normas EN 12697 utilizadas para a determinação dos requisitos empíricos que as misturas betuminosas devem satisfazer.

De acordo com a norma EN 13108-1 (secção 5.3.), os requisitos empíricos a satisfazer pela mistura betuminosa são: composição, granulometria, percentagem de ligante e aditivos, valores do ensaio Marshall para aplicação em aeroportos, vazios preenchidos com betume, vazios na mistura dos agregados e porosidade após 10 giros. Na formulação da mistura betuminosa segundo uma abordagem empírica, para além dos requisitos empíricos mencionados, a fórmula da mistura betuminosa deve satisfazer os requisitos para os materiais constituintes e os requisitos gerais, de acordo com as subsecções 3.3.1. e 3.3.2. da presente dissertação, respectivamente. Porém, para evitar a duplicação de especificações relativas às misturas betuminosas, não se devem considerar as seguintes combinações de requisitos: requisitos empíricos combinados com requisitos fundamentais, requisitos para os vazios preenchidos com betume combinados com os vazios na mistura de agregados, requisitos para a porosidade após 10 giros combinados com requisitos para a resistência à deformação permanente, valores de Marshall para aplicação em aeroportos combinados com requisitos para a resistência à deformação permanente.

A norma EN 13108-1 (Anexo nacional - Quadro 4) apenas selecciona como requisitos empíricos a granulometria e percentagem de betume, todavia no agrupamento dos métodos de ensaio constituintes deste grupo de normas teve-se em conta os requisitos empíricos aludidos na secção 5.3. da norma EN 13108-1. Assim, agruparam-se as partes da norma EN 12697 referentes aos métodos de ensaio usados na determinação das características que definem os requisitos empíricos da mistura betuminosa.

As normas que constituem o presente grupo e que se passarão a descrever de seguida são as seguintes:

- EN 12697-22 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Wheel tracking*)
- EN 12697-34 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Marshall test*)

EN 12697-22 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Wheel tracking*)

Esta norma descreve métodos de ensaio para determinar a susceptibilidade de materiais betuminosos para deformar sob carga. O ensaio é aplicável a misturas cujo tamanho do peneiro superior é inferior ou igual a 32 mm.

Os ensaios são aplicáveis aos provetes que, quer tenham sido fabricados em laboratório ou tenham sido obtidos por corte de um pavimento; as amostras de ensaio são mantidas num molde com a superfície nivelada com a borda superior do molde.

A susceptibilidade de deformação dos materiais betuminosos é avaliada através da medição da profundidade do fosso formado por passagens repetidas de uma roda carregada a uma temperatura fixa. Existem três tipos alternativos de dispositivos que podem ser usados de acordo com esta norma: dispositivos de tamanho grande, extra dispositivos de grande porte e dispositivos de pequeno porte.

EN 12697-34 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Marshall test*)

Esta norma define os métodos de ensaio para determinação dos valores relativos à estabilidade, deformação e quociente Marshall de provetes de misturas betuminosas, produzidas em conformidade com a EN 12697-35 e preparadas com o compactador de impacto segundo o método de ensaio definido na EN 12697-30. Este procedimento destina-se apenas a betões betuminosos com granulometria densa e a misturas betuminosas compactadas a quente.

3.3.4. REQUISITOS FUNDAMENTAIS

Baseado na análise da norma EN 13108-1, este grupo de normas abrange todas as partes da série de normas EN 12697 utilizadas para a determinação dos requisitos fundamentais que as misturas betuminosas devem satisfazer.

Embora não constem no anexo nacional da norma EN 13108-1 quaisquer referências a requisitos fundamentais, como referido anteriormente, a secção 5.4 da norma EN 13108-1 especifica os requisitos fundamentais a satisfazer pelas misturas betuminosas. Esses requisitos contemplam a granulometria, percentagem de ligante, rigidez, resistência à deformação permanente num ensaio de compressão triaxial e resistência à fadiga. Na formulação da mistura betuminosa segundo uma abordagem fundamental, para além dos requisitos fundamentais aqui mencionados, a fórmula da mistura betuminosa deve satisfazer os requisitos para os materiais constituintes e os requisitos gerais, de acordo com as sub-secções 3.3.1. e 3.3.2. da presente dissertação, respectivamente. Porém, para evitar a duplicação de especificações relativas às misturas betuminosas, não se devem considerar as seguintes combinações de requisitos: requisitos empíricos combinados com requisitos fundamentais, e requisitos para a resistência à deformação permanente combinados com requisitos de resistência à deformação permanente num ensaio de compressão triaxial.

De acordo com os requisitos fundamentais definidos na norma EN 13108-1 agruparam-se as partes da norma EN 12697 referentes aos métodos de ensaio que caracterizam as propriedades que constituem os requisitos fundamentais da mistura betuminosa.

As normas que constituem o presente grupo e que se passarão a descrever de seguida são as seguintes:

- EN 12697-24 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Resistance to fatigue*)
- EN 12697-25 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Cyclic compression test*)
- EN 12697-26 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Stiffness*)

EN 12697-24 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Resistance to fatigue*)

Esta norma especifica os métodos de ensaio para a caracterização da fadiga de misturas betuminosas através de testes alternativos, incluindo testes de flexão, directa e indirecta de ensaios de tracção. Os testes são realizados com material betuminoso compactado sob um carregamento sinusoidal ou carga controlada, utilizando diferentes tipos de amostras e suporte.

O procedimento é utilizado para classificar as misturas betuminosas com base na resistência à fadiga, como um guia para o desempenho relativo no pavimento, para obter dados para estimar o comportamento estrutural na estrada e para analisar dados de ensaio, de acordo com as especificações para misturas betuminosas.

Como esta norma não impõe um determinado tipo de dispositivo de ensaio, a escolha precisa das condições de ensaio depende das possibilidades e do intervalo de trabalho do dispositivo utilizado. Para a escolha das condições de ensaio específicas, os requisitos das normas de produto para misturas betuminosas devem ser respeitados. A aplicabilidade desta norma é descrita nas normas do produto para misturas betuminosas. Os resultados obtidos por métodos de ensaio diferentes não são assegurados a ser comparáveis.

EN 12697-25 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Cyclic compression test*)

Esta norma contém dois métodos de ensaio para determinar a resistência à deformação permanente de misturas betuminosas em ensaios de compressão cíclica. Estes ensaios permitem classificar diferentes misturas, servindo para verificar a aceitabilidade de uma dada mistura.

Um método de ensaio descreve o método para determinar as características de fluência de misturas betuminosas, por meio de um teste de compressão uni axial cíclico. Neste ensaio uma amostra cilíndrica é submetido a uma tensão cíclica axial. Para atingir um certo confinamento, o diâmetro da placa de carregamento é tomado menor que o da amostra.

O outro método de ensaio descreve o método para determinar as características de fluência de misturas betuminosas, por meio do ensaio de compressão triaxial cíclico. Neste ensaio uma amostra cilíndrica é submetido a uma tensão confinante e uma tensão cíclica axial. Este ensaio é mais frequentemente utilizado para fins de avaliação e desenvolvimento de novos tipos de misturas.

Esta norma aplica-se a amostras preparadas em laboratório ou tarolos retirados do pavimento. O tamanho máximo dos agregados utilizados é de 32 mm.

EN 12697-26 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Stiffness*)

Esta norma especifica os métodos de ensaio para a caracterização da rigidez de misturas betuminosas através de testes alternativos, incluindo testes de flexão, directa e indirecta de ensaios de tracção. Os ensaios são realizados em material betuminoso compactado sob um carregamento sinusoidal ou carga controlada, utilizando diferentes tipos de amostras e suporte.

Neste ensaio as amostras de forma adequada são deformadas na sua escala linear, sob cargas repetidas ou cargas controladas com taxa de deformação. As amplitudes de tensão e deformação são medidas, juntamente com a diferença de fase entre tensão e deformação.

O procedimento é utilizado para classificar as misturas betuminosas com base na rigidez, como um guia para o desempenho relativo no pavimento, para obter dados de forma a estimar o comportamento estrutural e analisar dados de ensaio, de acordo com as especificações para misturas betuminosas.

Como esta norma não impõe um determinado tipo de dispositivo de ensaio a escolha precisa das condições de ensaio depende das possibilidades e do intervalo de trabalho do dispositivo utilizado.

Para a escolha das condições de ensaio específicas, os requisitos das normas de produto para misturas betuminosas devem ser respeitados. A aplicabilidade desta norma é descrita nas normas do produto para misturas betuminosas.

3.3.5. PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS

Com base no conhecimento pessoal adquirido no estudo destes documentos normativos, formou-se este grupo que, abrange todas as partes da série de normas EN 12697 utilizadas para a preparação das amostras de misturas betuminosas. Este grupo engloba as normas que definem as exigências para a preparação das misturas betuminosas, desde a elaboração da mistura betuminosa à amostragem, assim como a determinação das dimensões das amostras.

As normas que constituem o presente grupo e que se passarão a descrever de seguida são as seguintes:

- EN 12697-27 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Sampling*)
- EN 12697-28 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Preparation of samples for determining binder content, water content and grading*)
- EN 12697-29 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Determination of the dimensions of a bituminous specimen*)
- EN 12697-35 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Laboratory mixing*)

EN 12697-27 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Sampling*)

Esta norma descreve métodos de ensaio para a amostragem de misturas betuminosas em estradas e outras áreas pavimentadas para determinar as suas propriedades físicas e composição.

EN 12697-28 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Preparation of samples for determining binder content, water content and grading*)

Esta norma descreve métodos de ensaio para preparar porções de ensaio para a determinação do ligante, teor em água e classificação de amostras de misturas betuminosas, quando as amostras enviadas para o laboratório têm uma massa superior ou igual a quatro vezes a porção de ensaio.

EN 12697-29 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Determination of the dimensions of a bituminous specimen*)

Esta norma define um método de ensaio para determinar as dimensões, através de medição, de provetes betuminosos cilíndricos, rectangulares e não-rectangulares.

O ensaio é aplicável aos provetes feitos em laboratório, aparados com o auxílio de uma serra, ou provetes extraídos de carotes recolhidos na estrada, aparados com o auxílio de uma serra. Este método é aplicável aos provetes feitos em laboratório, ou provetes extraídos de carotes recolhidos da estrada.

EN 12697-35 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Laboratory mixing*)

Esta norma descreve a metodologia de elaboração de uma mistura betuminosa em laboratório, para a preparação de provetes. A mistura betuminosa é preparada a uma temperatura de referência, dentro de um intervalo de tempo reduzido, de forma a minimizar a alteração mecânica dos agregados e betume. A temperatura de referência depende da classe do betume.

Esta norma especifica a temperatura para preparação da mistura com base nas diferentes classes de betume.

3.3.6. COMPACTAÇÃO

Baseado no conhecimento adquirido no estudo destas normas, criou-se este grupo que é constituído pelas partes da série de normas EN 12697 utilizadas na compactação das amostras de misturas betuminosas. Este grupo engloba as normas que definem as exigências de compactação para as misturas betuminosas, assim como os diversos procedimentos e equipamentos de compactação.

O recente desenvolvimento de novos procedimentos e equipamentos de compactação em laboratório, que procuram simular a compactação *in situ* de forma mais precisa levou à elaboração de novas especificações que aplicam estes novos procedimentos e equipamentos. As normas EN 12697 abrangem estes novos procedimentos e equipamentos.

As normas que constituem o presente grupo e que se passarão a descrever de seguida são as seguintes:

- EN 12697-10 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Compactibility*)
- EN 12697-30 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Specimen preparation, impact compactor*)
- EN 12697-31 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Specimen preparation, gyratory compactor*)
- EN 12697-32 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Laboratory compaction of bituminous mixtures by vibratory compactor*)
- EN 12697-33 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Specimen prepared by roller compactor*)

EN 12697-10 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Compactibility*)

Esta norma descreve três métodos de ensaio para caracterizar a compactação de uma mistura betuminosa, pela relação entre a sua baridade ou volume de vazios e a energia de compactação aplicada, usando um compactador de impacto (Marshall), compactador giratório, ou um compactador vibratório. A mistura betuminosa é compactada a uma temperatura prescrita com diferentes energias de compactação. Um dos dois métodos é utilizado: no primeiro método, duas ou mais amostras são compactadas com diferentes energias de compactação, e as suas baridades são medidas; no segundo método, determina-se o aumento de baridade de uma amostra após cada etapa da compactação e da sua diminuição de espessura. De seguida desenha-se um gráfico da baridade em função da energia de compactação. Quando é usado o compactador de impacto, a energia de compactação é caracterizada pelo número de golpes, quando é usado o compactador giratório, pelo número de giros e no caso do compactador vibratório, pela duração em segundos. A equação matemática obtém-se com base nos resultados experimentais, e os seus parâmetros caracterizam a compactação da mistura betuminosa.

Esta norma aplica-se a misturas betuminosas a quente (elaboradas em laboratório ou amostras recolhidas em obra) com D nunca superior a 31,5 mm em conformidade com EN 13043 para compactadores de impacto ou giratórios, e 40 mm para o compactador vibratório. Os resultados obtidos neste método servem para complementar os resultados da concepção da mistura.

EN 12697-30 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Specimen preparation, impact compactor*)

Esta norma descreve os métodos de moldagem de provetes de misturas betuminosas através de compactação por impacto. Estes provetes destinam-se essencialmente a serem utilizados na determinação da massa volúmica e de outras características mecânicas, como por ex., a estabilidade Marshall e deformação, em conformidade com a EN 12697-34.

Nesta norma, os provetes são preparados em conformidade com a norma EN 12697-35, ou recolhidos no local da obra em conformidade com a EN 12697-27 e são transferidos para um molde de compactação em aço. Em seguida, a mistura é compactada com um compactador de impacto permitindo a queda da massa deslizante a partir de uma determinada altura com a aplicação de um determinado número de pancadas, dentro de um determinado intervalo de tempo, sobre o provete. O provete é em seguida arrefecido à temperatura ambiente.

Esta norma aplica-se a misturas betuminosas (preparadas em laboratório ou resultantes da amostragem no local), com uma dimensão máxima de inertes inferior ou igual a 22,4 mm.

EN 12697-31 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Specimen preparation, gyratory compactor*)

Esta norma define o método de compactação de amostras cilíndricas de misturas betuminosas utilizando um compactador giratório. Tal compactação é obtida através da combinação de uma acção de corte rotativa e uma força vertical resultante aplicada por uma cabeça mecânica.

O método é utilizado para:

- a) Determinação do índice de vazios de uma mistura de um determinado número de giros;
- b) Determinação de uma curva baridade (ou de conteúdo vazio) versus o número de giros;
- c) Preparação de amostras de determinada altura e/ou com uma baridade pré-determinada, para os ensaios posteriores das suas propriedades mecânicas.

Esta norma aplica-se a misturas betuminosas (tanto as feitas em laboratório como as resultantes da amostragem do local de trabalho), com um tamanho superior do agregado não superior a 31,5 mm.

EN 12697-32 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Laboratory compaction of bituminous mixtures by vibratory compactor*)

Esta norma descreve um método de ensaio para a preparação de provetes betuminosos, usando uma técnica de compactação vibratória. Neste ensaio a amostra de mistura betuminosa é compactada por um martelo vibrador.

Esta norma é aplicável a misturas soltas ou tarolos retirados do pavimento e é usada para estabelecer uma baridade de referência para uma mistura betuminosa em conformidade com os procedimentos descritos na norma EN 12697-9, ou a facilidade de compactação, conforme a norma EN 12697-10.

EN 12697-33 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Specimen prepared by roller compactor*)

Esta norma define os métodos de compactação por rolo compactador de amostras de paralelepípedos (placas) de misturas betuminosas, a ser usadas directamente para os testes posteriores, ou a partir do qual os provetes são cortados.

Esta norma descreve os seguintes métodos de compactação:

- Método dos pneumáticos;
- Método de rolos de aço;
- Método do deslizar de placas.

Para uma dada massa de mistura betuminosa, as amostras são preparadas com energia de compactação controlada ou até um determinado volume, e posteriormente será obtida a percentagem de vazios.

3.3.7. RESTANTES NORMAS

Findada a organização temática da série de normas EN 12697, restam ainda algumas normas desta série que não se enquadram em nenhum dos grupos formados no âmbito desta organização temática. Desta forma, agrupam-se essas mesmas normas, passando-se a descrever algumas delas de seguida.

Este conjunto de normas é composto pelas seguintes partes da série de normas EN 12697:

- EN 12697-7 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Determination of bulk density of bituminous specimens by gamma rays*)
- EN 12697-9 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Determination of the reference density*)
- EN 12697-11 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Determination of the affinity between aggregates and bitumen*)
- EN 12697-14 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Water content*)
- EN 12697-15 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Determination of the segregation sensitivity*)
- EN 12697-17 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Particle loss of porous asphalt specimen*)
- EN 12697-18 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Binder drainage from porous asphalt*)
- EN 12697-19 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Permeability of specimen*)
- EN 12697-20 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Indentation using cube or Marshall specimen*)
- EN 12697-21 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Indentation using plate specimens*)
- EN 12697-23 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens*)
- EN 12697-36 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Determination of the thickness of a bituminous pavement*)
- EN 12697-37 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Hot sand test for the adhesivity of binder on pre-coated chippings for HRA*)
- EN 12697-38 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Test equipment and calibration*)
- EN 12697-40 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - In-situ drainability*)
- EN 12697-42 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Amount of foreign matter in reclaimed asphalt*)
- EN 12697-44 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Crack propagation by semi-circular bending test*)
- EN 12697-45 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Saturation ageing tensile stiffness (SATS) conditioning test*)
- EN 12697-46 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Low temperature cracking and properties*)
- EN 12697-47 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Determination of the ash content of Lake Asphalt*)

EN 12697-7 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Determination of bulk density of bituminous specimens by gamma rays*)

Esta norma define um método para medir a massa volúmica de misturas betuminosas utilizando uma transmissão do tipo banco de ensaio de radiação gama. É aplicável a provetes cilíndricos ou blocos preparados em laboratório ou provenientes de corte de um pavimento, para o qual a espessura e o coeficiente de absorção de massa, que é uma função da composição química são conhecidos. A espessura da amostra atravessada pela radiação deve ser entre 30 mm e 300 mm. Este método não se aplica às misturas contendo escórias com teor de metais ou composição química variável que pode afectar a absorção de raios gama.

A aplicabilidade dessa norma está descrita nas normas de produtos para misturas betuminosas.

EN 12697-9 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Determination of the reference density*)

Esta norma descreve um método de ensaio para determinação da baridade de referência das misturas betuminosas. Estas baridades são obtidas em amostras compactas usando três compactadores de diferentes energias de compactação que estejam em conformidade com a EN 12697-30, a EN 12697-31 e EN 12697-32, respectivamente, para o compactador de impacto, giratório e vibratório.

Esta norma é aplicável a misturas betuminosas elaboradas em laboratório ou de amostras recolhidas em obra, com D dependendo do método de compactação e nunca superior a 31,5 mm.

EN 12697-11 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Determination of the affinity between aggregates and bitumen*)

Esta norma define os procedimentos para a determinação da afinidade entre o agregado e o betume e a sua influência na susceptibilidade à remoção. Esta propriedade é destinada a auxiliar o projectista na concepção das misturas betuminosas, constituindo portanto num registo visual e não num tipo de ensaio propriamente dito. A susceptibilidade à remoção, conforme determinado por estes procedimentos, constitui uma medida indirecta do poder de adesão de um ligante a vários agregados, ou do poder de adesão de vários ligantes a um determinado agregado.

Estes procedimentos podem também ser utilizados para avaliar o efeito da humidade numa determinada combinação de agregado-ligante, com ou sem agentes de adesão incluindo líquidos, tais como aminos, fílers, como por exemplo, cal apagada ou cimento.

No método de rotação de garrafas, a afinidade é representada pelo registo visual do nível de cobertura do betume nas partículas de agregado mineral não compactadas e revestidas por betume, após a influência da acção de agitação mecânica na presença de água.

No método de ensaio estático, a afinidade é representada pelo registo visual do nível de cobertura do betume nas partículas de agregado mineral não compactadas e revestidas por betume, após armazenamento em água.

No método de ensaio de extracção com água a ferver, a afinidade é representada pelo registo visual do nível de cobertura do betume em agregados revestidos com betume e não compactados após imersão em água a ferver sob condições especificadas.

EN 12697-14 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Water content*)

Esta norma descreve um método de ensaio para a determinação do teor de água de amostras de misturas betuminosas. O método de ensaio é adequado para verificar a conformidade com a especificação do produto, quando necessário.

EN 12697-15 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Determination of the segregation sensitivity*)

Esta norma especifica um método de ensaio para a determinação da qualidade da mistura e a tendência de segregação na composição de misturas betuminosas a quente. Este método é considerado adequado para efeitos de projecto e para obter informações do cliente.

EN 12697-17 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Particle loss of porous asphalt specimen*)

Esta norma define um método de ensaio para determinar a perda de partículas de misturas betuminosas porosas. Esta perda de partículas é avaliada através da verificação da perda de massa de amostras de misturas betuminosas porosas após terem sido submetidas a rotações na máquina de Los Angeles.

Este ensaio permite calcular a abrasão das misturas betuminosas porosas. O ensaio é aplicável a misturas betuminosas porosas compactadas em laboratório, cuja passagem máxima ao peneiro não exceda 25 mm. Este ensaio não tem em conta o efeito abrasivo causado por pneus pitonados.

EN 12697-18 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Binder drainage from porous asphalt*)

Esta norma descreve dois métodos de ensaio:

- Método Basket;
- Método Schellenberg.

O *método Basket* descreve um método para determinar a drenagem do ligante nas misturas betuminosas. Este método mede directamente a drenagem de ligante, mas quando realizado em misturas betuminosas com fibras ou misturas com um teor de argamassa maior do que nas misturas betuminosas porosas. Pode ocorrer entupimento dos buracos nas cestas de drenagem, limitando a drenagem de ligante.

O *método Schellenberg* descreve um método para determinar a drenagem do ligante das misturas betuminosas. Para além das misturas betuminosas porosas ou misturas betuminosas porosas incorporando fibras, pode ser aplicável a outras misturas betuminosas.

EN 12697-19 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Permeability of specimen*)

Esta norma descreve um método para determinar a permeabilidade vertical e horizontal de provetes cilíndricos de misturas betuminosas.

Na realização deste ensaio, uma amostra cilíndrica é colocada numa coluna de água com altura constante sendo-lhe permitido permear durante um período de tempo controlado, tanto em no sentido vertical como no sentido horizontal, dependendo do parâmetro a ser medido. É medida a vazão de água (Q_v ou Q_h) e finalmente é calculada a permeabilidade (K_v ou K_h).

A norma aplica-se aos provetes cilíndricos retirados do pavimento da estrada, e amostras confeccionadas em laboratório. O diâmetro nominal de amostras deve ser de 100 mm ou 150 mm a menos que o tamanho de partícula nominal máximo do tamanho global exceder 22 mm; quanto ao diâmetro nominal, este deve ser de 150 mm de diâmetro.

EN 12697-23 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens*)

Esta norma define um método de ensaio para determinação da resistência à tracção indirecta de provetes cilíndricos de misturas betuminosas.

Neste ensaio, o provete cilíndrico a ser sujeito a ensaio é levado até à temperatura de ensaio predefinida, sendo em seguida colocado na máquina de ensaio de compressão e sujeito a uma carga diametral no sentido do eixo do cilindro com uma velocidade de deslocamento constante até à sua ruptura. A resistência à tracção indirecta consiste na tensão de tracção máxima calculada com base na carga máxima aplicada na altura da ruptura e nas dimensões do provete.

A determinação da sensibilidade à água dos provetes betuminosos, em conformidade com a norma europeia EN 12697-12, baseia-se na determinação da resistência a tracção indirecta de acordo com este método de ensaio.

EN 12697-36 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Determination of the thickness of a bituminous pavement*)

Esta norma descreve dois métodos de ensaio para determinar a espessura de um pavimento betuminoso. O primeiro método descreve medições realizadas em um ou mais carotes que foram perfurados em toda a profundidade da laje ou estrutura rodoviária (método destrutivo). O segundo método descreve medições efectuadas de forma electro-magnética (método não destrutivo).

EN 12697-38 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Test equipment and calibration*)

Esta norma define os requisitos gerais para equipamentos de ensaio comum, procedimentos de calibração e reagentes para os ensaios de materiais betuminosos na EN 12697.

EN 12697-40 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - In-situ drainability*)

Esta norma descreve um método de ensaio para determinar a condutividade hidráulica relativa in-situ, em locais específicos de pavimentação que são projectados para serem permeáveis. A partir do valor médio de uma série de determinações para cada troço de estrada, é obtida uma estimativa do valor médio para o revestimento superficial.

O ensaio mede a capacidade que determinada superfície tem para drenar a água in-situ. Como tal, pode ser usado como uma verificação de conformidade para garantir que uma camada superficial permeável tem as propriedades necessárias quando é colocada. Pode ser utilizado posteriormente para estabelecer a alteração da capacidade de drenagem com o tempo.

Para que o ensaio seja válido, a superfície da área de ensaio deve estar limpa e livre de detritos. As medições podem ser feitas quando a estrada está molhada ou seca, mas não se está num estado de congelamento.

3.4. APLICABILIDADE AO MERCADO PORTUGUÊS

Antes do aparecimento das normas europeias que especificam os métodos de ensaio para misturas betuminosas, em Portugal, as propriedades das misturas betuminosas a determinar no âmbito do estudo da formulação de misturas betuminosas têm vindo a ser determinadas em ensaios que seguem na sua maioria as normas ASTM e algumas especificações do LNEC.

Com a implementação da Directiva dos Produtos da Construção relativa à marcação CE de misturas betuminosas, surgiu a necessidade de aplicar os novos métodos de ensaio preconizados nas “normas harmonizadas” referidas anteriormente no presente trabalho. Com o surgimento da série de normas EN 12697 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt*), os laboratórios nacionais de ensaios de misturas betuminosas têm vindo aplicar gradualmente os métodos de ensaio por elas preconizados, substituindo deste modo as normas anteriormente empregadas. Contudo a aplicação dessas normas não se torna fácil, pois embora os novos métodos de ensaio sejam semelhantes aos existentes anteriormente, por vezes, surgem algumas dificuldades de interpretação e diversas contrariedades devido ao facto de não existirem valores de referência que possam servir de base. De entre essas dificuldades, destaca-se o facto de não existir versão oficial das normas em português, sendo necessário recorrer a processos de tradução que revelam muitas dificuldades de interpretação, nomeadamente alguns termos complexos. Têm vindo a ser desenvolvidas traduções para português pelas entidades responsáveis, portando, neste momento já existem versões oficiais em português de algumas destas normas. Neste sentido, constata-se que o processo de aplicação destas normas será moroso e progressivo.

Deste modo, considera-se importante fazer uma análise da situação actual da aplicabilidade ao mercado português da série de normas EN 12697. De forma a demonstrar a aplicação desta série de normas pelos laboratórios nacionais de ensaios de misturas betuminosas, foi elaborado o quadro 9, que representa uma listagem dos métodos de ensaio especificados pelas normas EN 12697 actualmente utilizados por alguns laboratórios nacionais. Esta listagem foi elaborada com base na informação recolhida através de contactos efectuados com os laboratórios de ensaios de empresas nacionais produtoras de misturas betuminosas. Os laboratórios que serviram de base nesta análise são: LGMC (Laboratório de geotecnia e materiais de construção do CICCOPN), Laboratório da Probigal - Ligantes Betuminosos, S.A e o laboratório da Lena Construções.

Quadro 9 - Listagem de ensaios com base nas normas EN 12697 efectuados por alguns laboratórios nacionais

Laboratório	Designação do ensaio	Norma
Lena Construções	Percentagem de betume pelo método de centrifugação com recuperação de finos	EN 12697-1
	Análise Granulométrica	EN 12697-2
	Densidade máxima	EN 12697-5
	Densidade aparente (4 provetes)	EN 12697-6
	Determinação das características dos vazios dos provetes	EN 12697-8
	Preparação de amostras para determinação da % de betume	EN 12697-28
	Determinação das dimensões de um provete	EN 12697-29
	Percentagem de betume pelo método de ignição	EN 12697-39
	Misturas em laboratório	EN 12697-35
	Preparação de provetes para o compactador de impacto (4 provetes)	EN 12697-30

Probigalp	Fabrico de Misturas em laboratório	EN 12967-35
	Preparação de provetes por compactador de impacto	EN 12697-30
	Determinação da baridade de provetes betuminosos	EN 12697-6
	Determinação da baridade máxima teórica	EN 12697-5
	Determinação das dimensões de provetes betuminosos	EN 12697-29
	Ensaio Cântabro	EN 12697-17
	Determinação das características relacionadas com os vazios de provetes betuminosos	EN 12697-8
	Determinação da sensibilidade à água de provetes betuminosos	EN 12697-12
	Fabrico de Misturas em laboratório	EN 12697-35
	Preparação de provetes por compactador de rolos	EN 12697-33
	Determinação da baridade de provetes betuminosos	EN 12697-6
	Ensaio de Pista	EN 12697-22
	Recuperação de Betume no evaporador rotativo	EN 12697-3
	Afinidade Agregado - Betume	EN 12697-11
	Resistência das misturas betuminosas ao fuel	EN 12697-43
	Conteúdo em ligante solúvel	EN 12697-1
	Determinação da sensibilidade à água de provetes betuminosos (6 provetes)	EN 12697-12
	Perda de massa de provetes de betão betuminoso drenante (5 provetes)	EN 12697-17
	Escorrimento do ligante	EN 12697-18
LGMC (CICCOPN)	Determinação da lei de fadiga	EN12697-24
	Determinação do módulo de deformabilidade dinâmico a 20 °C	EN12697-26
	Recuperação do betume de uma mistura betuminosa pelo método do roto-vapor	EN12697-3
	Ensaio de pista	EN 12697-22
	Determinação da lei de fadiga e do módulo de deformabilidade dinâmico a 20 °C (9 provetes)	EN12697-26

Actualmente a aplicação dos métodos de ensaio preconizados nas normas EN 12697 no mercado nacional ainda se encontra numa escala bastante reduzida, confirmando assim a tese de que a aplicação destas normas seria progressiva e morosa. Hoje em dia, a maioria dos laboratórios nacionais de ensaios de misturas betuminosas ainda realizam os ensaios de acordo com a normalização caducada, facto que se deve fundamentalmente à experiência adquirida ao longo dos últimos anos na realização de determinados ensaios. Contudo esta nova normalização já começa a constar das listas de ensaios dos laboratórios nacionais, como é possível verificar no quadro 9. Os métodos de ensaio para misturas betuminosas vêm sendo introduzidos gradualmente no mercado português, de acordo com as necessidades impostas pelo mercado actual português e europeu.

Os exemplos apresentados no quadro 9 referem-se a laboratórios em que os processos de aplicação das normas EN 12697 na realização de ensaios de misturas betuminosas já se encontram em fases bastante adiantadas, no entanto, existem outros laboratórios nacionais em que este processo se encontra bastante mais atrasado.

Com vista a acelerar o processo de aplicação destas normas europeias de métodos de ensaio para misturas betuminosas, contribuindo para a resolução de algumas dificuldades sentidas no meio técnico nacional, o InIR como um dos organismos responsáveis pela normalização nesta área de actividade tem vindo a solicitar estudos pró-normativos a alguns dos mais importantes laboratórios nacionais. Tais estudos apontam sobretudo para a obtenção de valores de referência para alguns dos métodos de ensaio constantes nas normas EN 12697.

Assim sendo, de forma a encontrar os tais valores de referência para determinados ensaios preconizados nas normas EN 12697, foram feitos recentemente vários estudos de comparação interlaboratorial relativos a diversos ensaios que constam nesta série de normas. Estes estudos de comparação interlaboratorial consistem essencialmente na realização, por vários laboratórios, de determinado ensaio presente nas novas normas e do mesmo ensaio segundo as normas caducadas, comparando os resultados obtidos nas duas metodologias de ensaio. Posteriormente será efectuada uma apresentação e discussão dos resultados obtidos por cada um dos laboratórios intervenientes no estudo. Finalmente será elaborado um relatório final do estudo de comparação interlaboratorial, no qual constarão todos os resultados obtidos e sua análise bem como recomendações acerca da aplicabilidade da norma em estudo.

Um dos exemplos foi o recente estudo de comparação interlaboratorial que foi efectuada no âmbito de um protocolo de cooperação entre o LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil) e o InIR, para avaliação da sensibilidade à água das misturas betuminosas compactadas aplicando a norma EN 12697-12. Este estudo teve como principais objectivos a obtenção de valores de referência para a sensibilidade à água de misturas com características diferentes, a avaliação da reprodutibilidade dos resultados obtidos através da aplicação da norma EN 12697-12 e a elaboração de recomendações relativas ao uso dessa norma. O plano de trabalhos deste estudo implicou a realização de ensaios de comparação interlaboratorial utilizando a norma EN 12697-12, envolvendo cinco laboratórios (Quadro 10), a análise dos resultados obtidos e a sua comparação com resultados obtidos através da metodologia utilizada anteriormente em Portugal (Norma Americana MIL – STD – 620A).

Quadro 10 – Laboratórios intervenientes no estudo de comparação interlaboratorial LNEC-InIR (FONTE: [1])

LNEC – Laboratório de Materiais de Pavimentação (PAVMAT)
CICCOPN – Laboratório LGMC
Construções Gabriel A S Couto S.A.
Mota-Engil – Laboratório Central
Monte Adriano Engenharia e Construção – Laboratório Central

Este tipo de estudos revela-se de extrema importância com vista a uma melhor aplicação destas normas no mercado português, assegurando uma correcta integração da norma estudada no mercado e fornecendo os valores de referência a ter em conta na sua utilização.

3.5. CONCLUSÃO

Pretendeu-se neste capítulo dar a conhecer e compreender de uma forma meticulosa a série de normas EN 12697, que especificam os métodos de ensaio para misturas betuminosas a quente para todos os estados membros europeus, incluindo Portugal.

Neste capítulo, começou-se por fazer um enquadramento normativo assim como uma breve apresentação das várias normas a analisar. Seguidamente optou-se por abordar as normas seguindo uma metodologia que se resume fundamentalmente na organização temática das diversas partes integrantes desta série de normas. Esta organização temática efectuada consiste simplesmente num agrupamento de normas de forma temática, possibilitando assim uma melhor análise e compreensão das mesmas. Esta organização das normas EN 12697 resulta de um critério pessoal e representa o resultado do estudo exaustivo desta série de normas no âmbito da presente dissertação, considerando-se que esta seria a mais correcta de apresentar e abordar o especificado nestas normas. Posteriormente apresentou-se a aplicabilidade das normas em estudo no mercado português, enunciando as dificuldades encontradas na sua aplicação assim como os métodos aplicados e os estudos feitos de forma a conseguir uma melhor aplicabilidade destas em Portugal. Expôs-se ainda o estado actual da aplicação destas normas, com base num trabalho de pesquisa acerca dos métodos de ensaio utilizados por alguns laboratórios nacionais desta temática.

Resumidamente, verifica-se que este capítulo pretende dar uma visão geral dos métodos de ensaio para misturas betuminosas a quente especificados nas normas EN 12697.

De modo a aprofundar o conhecimento acerca destas normas, prossegue-se o seu estudo apresentando-se no seguinte capítulo da presente dissertação a selecção de alguns dos métodos de ensaio (segundo a EN 12697) que serão alvo de uma análise mais detalhada.

4

APLICAÇÃO DE ALGUNS MÉTODOS DE ENSAIO (EN 12697)

4.1. INTRODUÇÃO

Uma vez feita uma análise geral dos métodos de ensaio para misturas betuminosas a quente especificados nas normas EN 12697, apresenta-se no presente capítulo a continuação do estudo desta série de normas, mas incidindo particularmente sobre alguns métodos de ensaio seleccionados para uma análise mais pormenorizada. Esta análise consiste basicamente em descrever o modo de aplicação de determinados métodos de ensaio preconizados nas normas EN 12697.

Serão alvo desta análise seis métodos de ensaio especificados pelas normas EN 12697. A selecção destes métodos de ensaio seguiu determinados critérios de escolha que serão descritos seguidamente.

No ponto 4.2. deste capítulo descreve-se, o método de ensaio para preparação de provetes de misturas betuminosas por compactador de impacto, à luz do especificado na norma EN 1297-30. Optou-se por apresentar este método de ensaio devido ao facto de a sua aplicação ser a mais utilizada recentemente em Portugal, no que diz respeito aos métodos de compactação de misturas betuminosas em laboratório, sendo mesmo o método de compactação proposto pela norma EN 13108-1 (Anexo nacional).

Seguidamente seleccionou-se um grupo de normas que se incluem na mesma temática, e que definem métodos de ensaio que visam determinar determinadas propriedades volumétricas das misturas betuminosas. Estes métodos de ensaio também são referidos na norma EN 13108-1 (Anexo nacional), e são de importância fundamental, pois com estes métodos de ensaio consegue-se caracterizar completamente uma mistura betuminosa em termos volumétricos. Deste modo, o presente capítulo inclui no seu ponto 4.3. uma análise do método de ensaio para determinação da baridade máxima teórica (de acordo com a EN 12697-5), o ponto 4.4. refere-se ao método de ensaio para a determinação da massa volúmica de provetes betuminosos (de acordo com a EN 12697-6), enquanto o ponto 4.5. apresenta o método de ensaio para a determinação das características dos vazios nas misturas betuminosas (de acordo com a EN 12697-8).

No ponto 4.6. do presente capítulo descreve-se o modo de aplicação do método de ensaio preconizado na norma EN 12697-12 referente à determinação da sensibilidade à água de provetes betuminosos. Sendo uma das propriedades relacionadas com o desempenho das misturas betuminosas, a sensibilidade à água é um factor importante na durabilidade dos pavimentos, em especial quando se trata de misturas para camadas de desgaste, daí a sua abordagem no âmbito da presente dissertação.

Finalmente, no ponto 4.7. deste capítulo optou-se por descrever o método de ensaio de tracção indirecta por compressão diametral de provetes cilíndricos. Este ensaio permite caracterizar a rigidez das misturas betuminosas e é contemplado pela norma EN 12697-26. No âmbito da presente dissertação considerou-se importante dar a conhecer um método de ensaio utilizado na determinação das propriedades fundamentais das misturas betuminosas, visto que a abordagem fundamental certamente será o futuro da formulação das misturas betuminosas. Assim sendo, decidiu-se descrever o ensaio de tracção indirecta por compressão diametral de provetes cilíndricos, que é um ensaios simples e com aplicação frequente na caracterização do comportamento mecânico de misturas betuminosas.

4.2. PREPARAÇÃO DE PROVETES POR COMPACTADOR DE IMPACTO (EN 12697-30)

Objectivo e campo de aplicação

Esta norma descreve os métodos de moldagem de provetes de misturas betuminosas através de compactação por impacto. Estes provetes destinam-se essencialmente a serem utilizados na determinação da massa volúmica e de outras características mecânicas, como por ex., a estabilidade Marshall e deformação, em conformidade com a EN 12697-34.

Esta norma aplica-se a misturas betuminosas (preparadas em laboratório ou resultantes da amostragem no local), com uma dimensão máxima de inertes inferior ou igual a 22,4 mm.

Princípio

Para a preparação dos provetes utiliza-se uma mistura betuminosa recém misturada, em conformidade com a norma EN 12697-35, ou recolhida no local, em conformidade com a EN 12697-27, que é colocada num molde de compactação em aço. Em seguida, a mistura é compactada num dos compactadores de impacto permitindo a queda da massa deslizante a partir de uma determinada altura com a aplicação de um determinado número de pancadas, dentro de um determinado intervalo de tempo, sobre o provete asfáltico. O provete é em seguida arrefecido à temperatura ambiente.

Equipamento de ensaio

- Compactador de impacto em conformidade com norma EN 12697-30 (Figura 9);
- Molde de compactação;
- Fornos ou placas de aquecimento;
- Bloco em aço;
- Blocos de protecção, placas deflectoras ou banhos de areia.

Procedimento de ensaio

- Se necessário após se proceder à mistura, a quantidade de mistura especificada para um provete poderá ser armazenada, num local não arejado, num forno regulado para uma temperatura máxima de 130°C, por um período não superior a 3h.
- A mistura deverá atingir rapidamente a temperatura de compactação (temperatura de referência dada na norma EN 12697-35).
- Aquecer a base do martelo de compactação e o molde todo antes da preparação do primeiro provete. Se os provetes forem sendo preparados por lotes, o base do martelo e a base do molde apenas deverão ser aquecidos antes da preparação do primeiro provete do lote.

- Colocar um disco de filtro na base do molde do sistema de compactação. Verter em porções a mistura aquecida no molde de compactação com a ajuda de um funil e distribuir a mistura com a ajuda de uma espátula. Após enchimento, alisar a superfície da mistura com a espátula e cobri-la com um segundo disco de filtro. O interior do molde de compactação não deverá ser revestido com um agente de separação.
- O método de compactação deverá ser imediatamente iniciado. Encher o molde e compactar o provete por um período não superior a 4 min. Logo que o martelo de compactação tenha sido instalado, compactar o provete aproximadamente 55s a 60s aplicando cerca de 50 pancadas.
- Inverter o molde de compactação e pressiona-lo até este ficar totalmente apoiado na base do molde. Compactar o provete aplicando novamente 50 pancadas. Terminar o processo de compactação dentro de um período de 4 min.
- Colocar o molde de compactação contendo o provete quente sobre um dos discos cilíndricos, na placa equipada com discos cilíndricos, para que o provete fique directamente apoiado no disco. Arrefecer o provete ao ar e retirá-lo do molde com o dispositivo de extrusão.



Fig. 9 - Compactador de impacto automático (Fonte: [2])

Relatório de ensaio

Relativamente a esta norma, o relatório de ensaio deve incluir a seguinte informação:

- a) Identificação da mistura;
- b) Método de fabrico da mistura, ou se esta foi amostrada de uma camada compactada, assim como a dimensão e localização da amostra;
- c) Tipo de compactador de impacto;
- d) Condições de ensaio;
- e) Temperatura de compactação;
- f) Número de pancadas.

4.3. DETERMINAÇÃO DA BARIDADE MÁXIMA TEÓRICA (EN 12697-5)

Objectivo e campo de aplicação

Esta norma define os métodos de ensaio para determinação da baridade máxima teórica de uma mistura betuminosa (isenta de vazios). Especifica um procedimento volumétrico, um procedimento hidrostático e um procedimento matemático.

Os métodos de ensaio descritos destinam-se a ser utilizados com misturas betuminosas soltas contendo betumes de pavimentação, betumes modificados ou outros ligantes betuminosos utilizados para misturas betuminosas a quente. Os ensaios são aplicáveis às misturas betuminosas frescas ou envelhecidas.

Termos e definições

- *Baridade máxima teórica* - Massa por unidade de volume, isenta de vazios preenchidos com ar, de uma mistura betuminosa a uma temperatura de ensaio conhecida.

- *Baridade* - Massa por unidade de volume, incluindo os vazios preenchidos com ar, de um provete a uma temperatura de ensaio conhecida.

- *Massa volúmica do material impermeável das partículas* - Quociente entre a massa de uma amostra de agregado seca em estufa e o volume que esta amostra ocupa dentro de água incluindo quaisquer poros internos fechados mas excluindo poros acessíveis à água.

- *Massa volúmica das partículas secas* - Quociente entre a massa de uma amostra de agregado seca em estufa e o volume que esta amostra ocupa dentro de água incluindo quaisquer poros internos e os poros acessíveis à água.

- *Baridade do agregado* - Quociente entre a massa do agregado seco preenchendo sem compactação um dado recipiente e a capacidade desse recipiente.

Princípio

A baridade máxima teórica, conjuntamente com a baridade, é utilizada para calcular a porosidade e outras propriedades volumétricas de uma mistura betuminosa compactada.

Nos procedimentos volumétrico e hidrostático, a baridade máxima teórica das misturas betuminosas é determinada a partir do quociente entre a massa seca da amostra e do seu volume quando isenta de vazios.

No procedimento volumétrico, o volume da amostra é determinado através do volume de água ou de solvente deslocado pela amostra dentro de um picnómetro.

No procedimento hidrostático, o volume da amostra é calculado a partir da massa seca da amostra e da sua massa quando imersa em água.

No procedimento matemático, a baridade máxima teórica de uma mistura betuminosa é calculada a partir da sua composição (percentagem de ligante e percentagem de agregados) e das massas volúmicas dos seus constituintes.

Equipamento de ensaio

- Câmara ventilada;
- Balança;
- Termómetro;
- Banho de água;
- Mesa de vibração;
- Picnómetro (para o método volumétrico), ver figura 10;
- Sistema de vácuo (para o método volumétrico), ver figura 10;
- Recipiente que permita a sua suspensão na água (para o método hidrostático);
- Enxugador de vácuo (para o método hidrostático).

Procedimento de ensaio

→ Procedimento volumétrico

- Pesar o picnómetro de volume conhecido (V_p), vazio, incluindo a tampa (m_1).
- Colocar a amostra de ensaio seca no picnómetro e deixá-la atingir a temperatura ambiente. Pesar novamente em conjunto com a tampa (m_2).
- Encher o picnómetro com água desareada ou solvente, até um máximo de 30 mm abaixo do encaixe da tampa.
- Libertar o ar aprisionado aplicando um vácuo parcial com uma pressão residual de 4kPa ou inferior, durante (15 ± 1) min.
- Ajustar a tampa, e cuidadosamente encher o picnómetro com água desareada ou solvente até muito próximo da marca de referência ou do encaixe da tampa.
- Quando se utilizar água, colocar o picnómetro num banho de água a uma temperatura de ensaio uniforme ($\pm 1,0^\circ\text{C}$) e conhecida, por um período mínimo de 30 min. e máximo de 180 min., de forma a que a temperatura da amostra e da água desareada no picnómetro atinja a temperatura do banho de água.
- Quando se utilizar solvente, colocar o picnómetro num banho de água a uma temperatura de ensaio uniforme ($\pm 0,2^\circ\text{C}$) e conhecida, por um período mínimo de 60min. e máximo de 180 min., de forma a que a temperatura da amostra e da água desareada no picnómetro atinja a temperatura do banho de água.
- O nível da água no banho deverá situar-se aproximadamente 20 mm abaixo do topo do picnómetro.
- Encher o picnómetro com água ou solvente até à marca de referência. O recipiente com água ou solvente deverá ser mantido à temperatura de ensaio num banho de água.
- Retirar o picnómetro do banho de água, secar o seu exterior com um pano e proceder imediatamente à sua pesagem (m_3).



Fig. 10 - Realização do ensaio (Método volumétrico)

→ *Procedimento hidrostático*

- Determinar a massa do recipiente vazio ao ar (m_1), e submerso em água (m_2). Colocar a amostra de ensaio no recipiente seco e deixar atingir a temperatura ambiente, determinando em seguida a massa do recipiente mais a amostra de ensaio, ao ar (m_3).
- Encher o recipiente com água desareada e libertar o ar aprisionado, através de agitação e/ou vibração.
- Colocar o recipiente num banho de água a uma temperatura uniforme ($\pm 1,0^\circ\text{C}$) e conhecida, na gama de 20°C a 30°C , durante pelo menos 30 min., para que a temperatura da amostra e da água no recipiente atinja a temperatura do banho de água.
- O nível da água no banho deverá situar-se aproximadamente 20 mm abaixo do topo do recipiente.
- Determinar a massa do recipiente mais a amostra de ensaio, suspensos na água (m_4).

→ *Procedimento matemático*

- Indicar a composição da mistura em percentagens da mistura total (percentagem de agregado + percentagem de ligante = 100,0% (em massa)).
- Nos casos em que se desconhece a composição da mistura, a percentagem de ligante deverá ser determinada em conformidade com a EN12697-1.
- As massas volúmicas deverão ser determinadas em conformidade com a EN 1097-6 no que se refere aos agregados e em conformidade com a EN ISO 3838 no que se refere aos ligantes.

Cálculos

→ Procedimento volumétrico

A baridade máxima teórica (ρ) da mistura betuminosa determinada através do procedimento volumétrico deverá ser calculada com aproximação a 1kg/m³ da seguinte forma:

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{1000 \times V_P - \frac{m_3 - m_2}{\rho_w}} \quad (1)$$

Onde:

ρ_{mv} é a baridade máxima teórica da mistura betuminosa, determinada pelo método volumétrico (kg/m³);

m_1 é a massa do picnómetro mais a tampa (g);

m_2 é a massa do picnómetro mais a tampa e a amostra (g);

m_3 é a massa do picnómetro mais a tampa, a amostra e a água ou solvente (g);

V_P é o volume do picnómetro, cheio até à marca de referência (m³);

ρ_w é a massa volúmica da água ou do solvente à temperatura de ensaio (kg/m³).

→ Procedimento hidrostático

A baridade máxima teórica (ρ_{mh}) da mistura betuminosa determinada através do procedimento hidrostático deverá ser calculada com aproximação a 1kg/m³, da seguinte forma:

$$\rho_{mh} = \frac{m_3 - m_1}{(m_3 - m_1) - (m_4 - m_2)} \times \rho_w \quad (2)$$

Onde:

ρ_{mh} é a baridade máxima teórica da mistura betuminosa calculada através do procedimento hidrostático (kg/m³);

m_1 é a massa do recipiente ao ar (g);

m_2 é a massa do recipiente suspenso na água (g);

m_3 é a massa do recipiente mais a amostra ao ar (g);

m_4 é a massa do recipiente mais a amostra suspensos na água (g);

ρ_w é a massa volúmica da água à temperatura de ensaio (kg/m³).

→ Procedimento matemático

A baridade máxima teórica (ρ_{mc}) da mistura betuminosa determinada através do procedimento matemático deverá ser calculada com aproximação a 1kg/m, da seguinte forma:

$$\rho_{mc} = \frac{100}{(p_a/\rho_a) - (p_b/\rho_b)} \quad (3)$$

Onde:

ρ_{mc} é a baridade máxima teórica da mistura determinada por cálculo, (kg/m³)

p_a é a percentagem de agregado existente na mistura (em massa);

ρ_a é a massa volúmica do material impermeável do agregado (kg/m³);

p_b é a percentagem de ligante existente na mistura (em massa);

ρ_b é a massa volúmica do ligante a 25°C (kg/m³);

$p_a + p_b = 100,0\%$ (em massa).

Relatório de ensaio

Relativamente a esta norma, o relatório de ensaio deve incluir a seguinte informação:

- a) Procedimento de ensaio e método utilizado;
- b) Temperatura de ensaio, em graus Celsius (°C);
- c) Massa volúmica máxima da mistura betuminosa, em quilogramas por metro cúbico arredondada até 1kg/m³;
- d) Relativamente ao método matemático, o relatório de ensaio deverá incluir a seguinte informação adicional:
- e) Composição do material, em % (m/m) arredondada até 0,1%;
- f) Massas volúmicas aparentes do agregado e do ligante, em quilogramas por metro cúbico arredondadas até 1kg/m³.

4.4. DETERMINAÇÃO DA MASSA VOLÚMICA DE PROVETES BETUMINOSOS (EN 12697-6)

Objectivo e campo de aplicação

Esta norma define os métodos de ensaio para determinação da massa volúmica de um provete betuminoso compactado. Os métodos de ensaio são aplicáveis à utilização de provetes compactados fabricados em laboratório ou de tarolos retirados do pavimento após colocação e compactação.

Esta norma descreve os quatro seguintes métodos, cuja escolha depende do teor calculado e da acessibilidade de vazios no provete:

- massa volúmica – seca (para provetes com superfície muito fechada);
- massa volúmica – superfície saturada seca, SSS, (para provetes com uma superfície fechada);
- massa volúmica – provete selado (para provetes com uma superfície aberta ou grosseira)
- massa volúmica por dimensões (para provetes com uma superfície homogénea e com formas geométricas, ou seja, quadrados, rectângulos, cilindros,...)

Termos e definições

- *Baridade máxima* - Massa por unidade de volume, sem vazios de ar, de uma mistura betuminosa a uma determinada temperatura de ensaio.

- *Massa volúmica* - Massa por unidade de volume, incluindo os vazios de ar, de uma mistura betuminosa a uma determinada temperatura de ensaio.

Princípio

A massa volúmica de um provete betuminoso compactado intacto é determinada com base na massa do provete e do seu volume. A massa do provete é obtida pela pesagem do provete seco ao ar.

Para os primeiros 3 métodos, o volume do provete é obtido com base na massa ao ar e na sua massa em água. No método seco, a massa em água é determinada sem tratamento prévio. No SSS, o provete é primeiramente saturado com água, e, de seguida, a sua superfície é seca com uma camurça húmida. No método com o provete selado, o provete é selado antes da sua imersão em água para evitar o ingresso de água nos vazios do provete. No quarto método por dimensões, o volume do provete é obtido a partir da medição das dimensões.

Equipamento de ensaio

- Balança;
- Termómetro;
- Banho de água (Figura 11);
- Camurça húmida para secar e limpar o provete (método SSS);
- Calibradores (método das dimensões).

Procedimento de ensaio

→ **MÉTODO A: Massa volúmica – a seco**

- a) Determinação da massa do provete seco (m_1). No caso do ensaio de provetes húmidos, a etapa a) deverá ser efectuada após as etapas b) e d).
- b) Determinação da massa da água à temperatura de ensaio arredondada até $0,1 \text{ kg/m}^3$ (ρ_w), de acordo com o quadro 1 desta norma.
- c) Imersão do provete no banho de água a uma determinada temperatura de ensaio.
- d) Determinação da massa do provete imediatamente após a água ter estabilizado após a imersão (m_2).

→ **MÉTODO B: Massa volúmica – superfície saturada seca (SSS)**

- a) Determinação da massa do provete seco (m_1). No caso do ensaio de provetes húmidos, a etapa a) deverá ser efectuada após as etapas b) e f).
- b) Determinação da massa da água à temperatura de ensaio arredondada até $0,1 \text{ kg/m}^3$ (ρ_w), de acordo com o quadro 1 desta norma.
- c) Imersão do provete no banho de água a uma determinada temperatura de ensaio. Deixar a água saturar o provete durante um período de tempo suficiente até a massa do provete não sofrer alterações.
- d) Determinação da massa do provete saturado quando imerso (m_2), tomando as precauções necessárias para evitar a aderência de bolhas de ar à superfície do provete.
- e) Remoção do provete da água, secar as gotas da superfície com uma camurça húmida.
- f) Determinação da massa do provete saturado com a superfície limpa ao ar, imediatamente após a secagem (m_3).

→ *MÉTODO C: Massa volúmica – provete selado*

- a) Determinação da massa do provete seco (m_1).
- b) Determinação da massa da água à temperatura de ensaio arredondada até $0,1 \text{ kg/m}^3$ (ρ_w), de acordo com o quadro 1 desta norma.
- c) Selar o provete de forma a evitar que a água penetre nos vazios internos do provete e que façam parte da composição do material volumétrico e por forma a evitar o aparecimento de vazios adicionais entre o selante e o provete ou nos vincos do selante.
- d) Determinação da massa do provete seco (m_2).
- e) Mergulhar o provete no banho de água conservado a uma determinada temperatura de ensaio.
- f) Determinação da massa do provete selado debaixo de água (m_3), tomando as precauções necessárias para evitar a adesão de bolhas de ar ao selante durante a pesagem.

→ *MÉTODO D: Massa volúmica por dimensões*

- a) Determinação das dimensões do provete em milímetros, em conformidade com a EN 12697-29.
- b) Determinação da massa do provete seco (m_1).



Fig. 11 - Provetes em banho de água

Cálculos

→ *MÉTODO A: Massa volúmica – a seco*

Calcular a massa volúmica a seco do provete (ρ_{bdry}) arredondada até 1 kg/m^3 , da seguinte forma:

$$\rho_{bdry} = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \times \rho_w \quad (4)$$

Onde:

ρ_{bdry} é a massa volúmica seca (kg/m³);

m_1 é a massa do provete seco (g);

m_2 é a massa do provete em água (g);

ρ_w é a massa da água à temperatura de ensaio (1kg/m³).

→ *MÉTODO B: Massa volúmica – SSS*

Calcular a massa volúmica (SSS) do provete (ρ_{bssd}) arredondada até 1 kg/m³, da seguinte forma:

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w \quad (5)$$

Onde:

ρ_{bssd} é a massa volúmica SSS (kg/m³);

m_1 é a massa do provete seco (g);

m_2 é a massa do provete em água (g);

m_3 é a massa do provete saturado com a superfície seca (g);

ρ_w é a massa da água à temperatura de ensaio (1kg/m³).

→ *MÉTODO C: Massa volúmica – provete selado*

Calcular a massa volúmica do provete seco e selado (ρ_{bsea}) arredondada até 1 kg/m³, da seguinte forma:

$$\rho_{bsea} = \frac{m_1}{(m_2 - m_3/\rho_w) - (m_2 - m_1/\rho_{sm})} \quad (6)$$

Onde:

ρ_{bsea} é a massa volúmica selada (kg/m³);

m_1 é a massa do provete seco (g);

m_2 é a massa do provete selado seco (g);

m_3 é a massa do provete selado em água (g);

ρ_w é a massa da água à temperatura de ensaio (1kg/m³).

→ *MÉTODO D: Massa volúmica por dimensões*

Calcular a massa volúmica por dimensões de um provete cilíndrico ($\rho_{b,dim}$) arredondada até 1 kg/m³, da seguinte forma:

$$\rho_{b,dim} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} \times h \times d^2} \times 10^6 \quad (7)$$

Onde:

ρ_{bssd} é a massa volúmica do provete no método “por dimensões” (kg/m^3);

m_1 é a massa do provete seco (g);

h é a altura do provete (mm);

l é o comprimento do provete (mm);

d é a largura do provete (mm).

Relatório de ensaio

Relativamente a esta norma, o relatório de ensaio deve incluir a seguinte informação:

- a) Origem do provete;
- b) Espessura do provete, em milímetros, se for retirado de uma estrada;
- c) Massa do provete seco, em gramas;
- d) Método de ensaio adoptado;
- e) Material selante utilizado, quando aplicável;
- f) Massa volúmica, em quilogramas por metro cúbico arredondada até 1kg/m^3 .

4.5. DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS VAZIOS (EN 12697-8)

Objectivo e campo de aplicação

Esta norma define um método para calcular duas características volumétricas de uma amostra de mistura betuminosa compactada: o índice de vazios (V_m) e o índice de vazios no agregado mineral que estão ocupados por ligante (V_{FB}).

Os métodos de ensaio são aplicáveis à utilização de provetes compactados fabricados em laboratório ou de tarolos retirados do pavimento após colocação e compactação.

Estas características volumétricas podem ser utilizadas como critérios de concepção da mistura ou como parâmetros para avaliar a mistura após a sua colocação e compactação na estrada.

Termos e definições

- *Vazio* - Espaço de ar entre betume revestido e partículas agregadas numa amostra de mistura betuminosa compactada.
- *Índice de vazios (V_m)* - Volume de vazios num provete de mistura betuminosa, expresso em percentagem do volume total do provete.
- *Baridade máxima* - Massa por unidade de volume sem vazios, de uma amostra à temperatura de ensaio conhecida.
- *Densidade* - Massa por unidade de volume, incluindo vazios, de uma amostra à temperatura de ensaio conhecida.
- *Vazios no agregado mineral (VMA)* - Volume inter-granular de vazios entre as partículas de agregado numa mistura betuminosa compactada, que inclui os vazios e o volume de ligante betuminoso na amostra, expresso como uma percentagem do volume total da amostra.
- *Vazios ocupados por ligante (VFB)* - Percentagem de vazios no agregado mineral, ocupados por ligante.

Determinação do índice de vazios (V_m)*→ Princípio*

O índice de vazios de um provete betuminoso é calculado utilizando a baridade máxima da mistura e a densidade da amostra.

→ Cálculos

O índice de vazios deve ser calculado com aproximação de 0,1% (v/v) como se segue:

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100 \% \text{ (v/v)} \quad (8)$$

Onde:

V_m é o índice de vazios na mistura;

ρ_m é a baridade máxima da mistura (kg/m³);

ρ_b é a massa volúmica do provete (kg/m³).

→ Relatório de ensaio

Relativamente a esta norma, o relatório de ensaio deve incluir a seguinte informação:

- a) Origem da amostra;
- b) Os métodos utilizados para determinar a baridade máxima e massa volúmica;
- c) A baridade máxima e a massa volúmica, em quilogramas por metro cúbico;
- d) O índice de vazios em 0,1% (v / v)

Determinação da percentagem de vazios no agregado mineral ocupados por ligante (VFB)*→ Princípio*

A percentagem de vazios no agregado mineral ocupados por ligante é calculada a partir do teor em ligante, os vazios no agregado mineral, a densidade da amostra e a baridade do ligante.

→ Cálculos

A percentagem de vazios no agregado mineral ocupados por ligante deve ser calculada com aproximação de 0,1% (v/v) como se segue:

$$VFB = ((B \times \rho_b / \rho_B) / VMA) \times 100 \% \text{ (v/v)} \quad (9)$$

Onde:

VFB é a percentagem de vazios no agregado mineral ocupados por ligante;

B é a percentagem de ligante na amostra (em 100% da mistura), em 0,1 % (v/v);

ρ_b é a massa volúmica do provete (kg/m³);

ρ_B é a densidade do ligante (kg/m³);

VMA é o índice de vazios no agregado mineral (Figura 12), em 0,1 % (v/v)

→ *Relatório de ensaio*

Relativamente a esta norma, o relatório de ensaio deve incluir a seguinte informação:

- Origem da amostra;
- Teor de ligante (na mistura), em 0,1% (m/m);
- Massa volúmica do provete e densidade do ligante, em kg/m³;
- Percentagem de vazios no agregado mineral ocupados por ligante, em 0,1% (v/v).

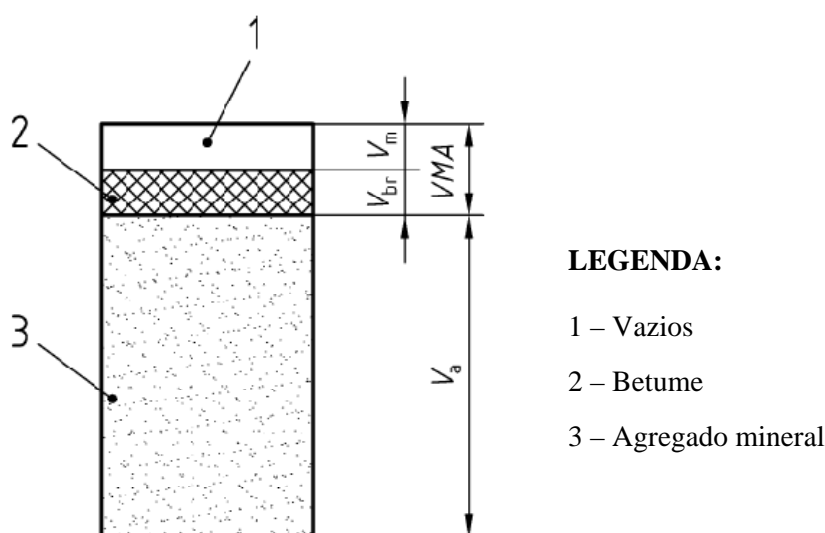


Fig. 12 - Índice de vazios no agregado mineral (VMA)

4.6. DETERMINAÇÃO DA SENSIBILIDADE À ÁGUA (EN 12697-12)

Objectivo e campo de aplicação

Esta norma define um método de ensaio para determinação do efeito da saturação e do condicionamento acelerado em água na resistência à tracção indirecta de provetes cilíndricos de misturas betuminosas.

Este método pode ser utilizado para avaliação do efeito da humidade com ou sem a integração de aditivos para melhoria da adesividade, incluindo líquidos.

Termos e definições

- *ITSR* - Resistência conservada em tracção indirecta, calculada como o quociente entre a resistência à tracção dos provetes condicionados em água e a resistência dos provetes secos, expressa em percentagem.

- *Sensibilidade à água* - É expressa como o valor de ITSR obtida em provetes compactados de uma mistura betuminosa.

- *Resistência à tracção indirecta (ITS)* - É expressa como o valor de ITSR obtida em provetes compactados de uma mistura betuminosa.

- *Proвете cilíndrico* - Proвете cilíndrico moldado em laboratório ou tarolo recolhido de uma camada betuminosa.

- *Exactidão* - A proximidade de concordância entre os resultados de ensaios independentes obtidos em determinadas condições.

- *Repetibilidade* - Exactidão obtida sob condições de repetibilidade

- *Condições de repetibilidade* - Condições nas quais os resultados de ensaio independentes são obtidos através da aplicação do mesmo método em provetes idênticos, tendo sido efectuado no mesmo laboratório pelo mesmo operador e utilizando o mesmo equipamento dentro de intervalos de tempo curtos.

- *Limite de repetibilidade* - Limite que corresponde a uma probabilidade de 95% para que se obtenha uma diferença absoluta entre dois resultados de ensaios obtidos em condições de repetibilidade inferior ou igual a esse valor.

- *Reprodutibilidade* - Exactidão em condições de reprodutibilidade.

- *Condições de reprodutibilidade* - Condições nas quais os resultados de ensaio são obtidos através da aplicação do mesmo método em provetes idênticos, tendo sido efectuado em laboratórios diferentes com operadores diferentes e utilizando equipamentos diferentes.

- *Limite de reprodutibilidade* - Limite que corresponde a uma probabilidade de 95% para que se obtenha uma diferença absoluta entre dois resultados de ensaios obtidos em condições de reprodutibilidade inferior ou igual a esse valor.

- *Resultado de ensaio único* - Valor obtido pela aplicação plena de um método de ensaio normalizado, uma vez, a um único provete. Este valor poderá ser a média de uma ou mais observações ou o resultado do cálculo de um grupo de observações, tal como definido pelo método de ensaio.

Princípio

Um grupo de provetes cilíndricos é dividido em dois subgrupos de dimensões idênticas sendo em seguida sujeitos a condicionamento. Um dos subgrupos é mantido seco à temperatura ambiente, enquanto o outro subgrupo é saturado e armazenado em água a uma temperatura de condicionamento elevada.

Após condicionamento, a resistência à tracção indirecta de cada um dos subgrupos é determinada, em conformidade com a norma EN 12697-23.

Procede-se à determinação da resistência conservada em tracção indirecta através do quociente entre a resistência do subgrupo condicionado em água e resistência do subgrupo seco, expressa em termos de percentagem.

Equipamento de ensaio

- Máquina de ensaio de compressão;
- Banho Maria termostaticamente controlado ou câmara de ar;
- Recipiente de vácuo;
- Câmara de ar termostaticamente controlada;
- Equipamentos necessários para determinar a baridade dos provetes, em conformidade com a norma EN 12697-6;
- Equipamentos necessários para efectuar o ensaio de resistência à tracção indirecta, em conformidade com a norma EN 12697-23;
- Dispositivos para determinar as dimensões dos provetes, em conformidade com a norma EN 12697-29.

Procedimento

→ Preparação dos provetes

- Devem ser preparados seis provetes cilíndricos por cada amostra a ensaiar. Devem ser cilíndricos, moldados em laboratório de acordo com as normas EN 12697-30, EN 12697-31 ou EN 12697-32, ou carotes recolhidos de uma camada betuminosa, em conformidade com a norma EN 12697-27.
- Os provetes devem ser compactados até atingirem uma baridade e uma porosidade correspondente às condições previstas em obra. As dimensões e a baridade de cada um dos provetes devem ser determinadas em conformidade com as normas europeias EN 12697-29 e EN 12697-6, respectivamente.
- Os provetes devem ser divididos em dois subgrupos tendo aproximadamente o mesmo comprimento médio e a mesma baridade média. A diferença do comprimento média e da baridade média não deve ser superior a 5mm e 30kg/m³, respectivamente.
- Os provetes dos dois subgrupos devem ter a mesma idade, devendo ser submetidos a uma cura de pelo menos 16h antes de se iniciar o condicionamento.

→ Condicionamento

- Armazenar os provetes secos numa superfície plana à temperatura ambiente no laboratório ($20 \pm 5^\circ\text{C}$).
- Colocar os provetes húmidos na prateleira perfurada no recipiente de vácuo (Figura 13) cheio com água destilada a ($20 \pm 5^\circ\text{C}$) até pelo menos um nível de 20mm acima da superfície dos provetes.
- Aplicar o vácuo para obtenção de uma pressão absoluta (residual) de $6,7 \pm 0,3$ kpa em 10 ± 1 min. Manter o vácuo durante 30 ± 5 min, em seguida deixar entrar lentamente a pressão dentro do recipiente de vácuo.
- Deixar os provetes imersos em água durante um período adicional de 30 ± 5 min.
- Medir as dimensões dos provetes em conformidade com a norma N 12697-29. Calcular o volume dos provetes. Rejeitar os provetes que tenham sofrido um aumento de volume superior a 2%.
- Colocar os provetes húmidos num banho-maria a $40 \pm 1^\circ\text{C}$ durante um período entre 68h a 72h.
- Nos casos em que se utilizem betumes mais moles que os da classe 100/150, a temperatura da água deve ser reduzida para $30 \pm 1^\circ\text{C}$.



Fig. 13 - Provetes submetidos a vácuo

→ *Procedimento de ensaio*

- Levar os provetes à temperatura de ensaio (Figura 14-a)). A temperatura de ensaio deve ser escolhida num intervalo entre 5°C e 25°C com uma tolerância de $\pm 2^\circ\text{C}$, sendo recomendada uma temperatura padrão de ensaio de $25 \pm 2^\circ\text{C}$.
- Levar os provetes secos à temperatura de ensaio colocando-os: num banho-maria protegendo o provete da água através da utilização de um saco de plástico macio assegurando que a protecção estanque se encontra firmemente pressionada contra a superfície do provete para permitir uma adequada transmissão de calor, ou numa câmara-de-ar termostaticamente controlada.
- Levar os provetes húmidos à temperatura de ensaio colocando-os: directamente num banho-maria, ou em sacos de plástico macios a prova de fugas, cheios de água e colocados numa câmara-de-ar termostaticamente controlada.
- Secar os provetes húmidos com uma toalha e prosseguir com o procedimento seguinte: Determinar a resistência à tracção indirecta nos provetes, em conformidade com a norma EN 12697-23. A determinação da resistência à tracção indirecta (Figura 14-b)) deve ser efectuada num prazo de 1 min. após o provete ter sido retirado da água de condicionamento.

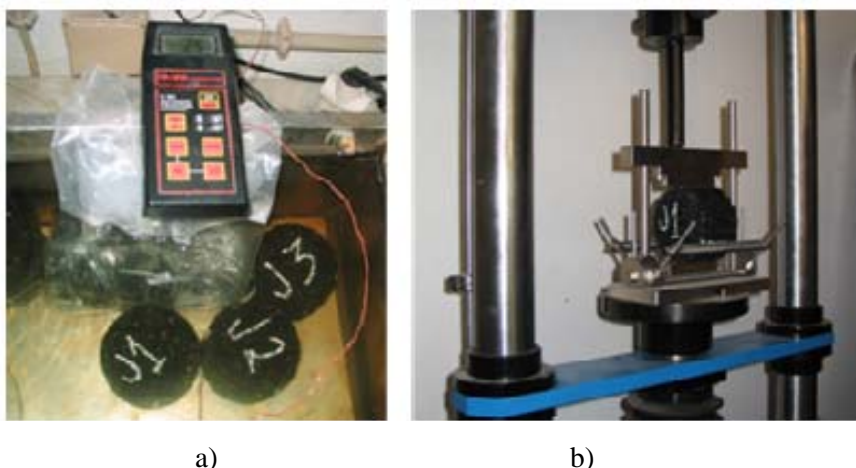


Fig. 14 - (a) Condicionamento dos provetes à temperatura de ensaio; (b) Ensaio de tracção indirecta

Cálculos

Calcular a resistência conservada em tracção directa (ITSR), de acordo com a seguinte fórmula:

$$ITSR = 100 \times \frac{ITS_w}{ITS_d} \quad (10)$$

Onde:

ITSR é a resistência conservada em tracção indirecta (%);

ITS_w é a resistência à tracção indirecta média do grupo húmido, expressa em kpa, com arredondamento até três algarismos significativos.

ITS_d é a resistência à tracção indirecta média do grupo seco, expressa em kpa, com arredondamento até três algarismos significativos.

Relatório de ensaio

O relatório de ensaio deve incluir a seguinte informação:

- a) Identificação, número e tipo de mistura;
- b) Número de provetes;
- c) Tipo de provetes (fabricados em laboratório, cortados ou moldados, ou tarolos de um pavimento – consultar a norma europeia aplicável), e tempo de armazenamento decorrido entre o fabrico e o ensaio;
- d) Diâmetro médio, comprimento e baridade dos provetes para cada um dos dois subgrupos de provetes (húmidos e secos);
- e) Temperatura de ensaio;
- f) Resistência à tracção indirecta média em quilopascal de cada um dos dois subgrupos (húmidos e secos);
- g) Resistência conservada em tracção indirecta em percentagem;
- h) Tipo de rotura (linha de rotura de tracção indirecta evidente, rotura por deformação, ou rotura combinada), observação do revestimento de ligante na superfície do agregado exposto, e observação da presença de agregado fracturado ou esmagado;
- i) Informação de que o ensaio foi efectuado de acordo com o presente método.

4.7. CARACTERIZAÇÃO DA RIGIDEZ DE MISTURAS BETUMINOSAS - ENSAIO DE TRACÇÃO INDIRECTA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DE PROVETES CILÍNDRICOS (EN 12697-26)

Objectivo e campo de aplicação

Esta norma especifica os métodos de ensaio para a caracterização da rigidez de misturas betuminosas através de métodos alternativos descritos em cinco anexos:

- Ensaio de flexão realizados em provetes trapezoidais ou em provetes prismáticos com carregamento em dois pontos (Anexo A);
- Ensaio de flexão realizados em provetes prismáticos com carregamento em três ou quatro pontos (Anexo B);
- Ensaio de tracção indirecta em provetes cilíndricos (Anexo C);
- Ensaio de tracção-compressão directa uniaxial em provetes cilíndricos (Anexo D);
- Ensaio de tracção directa uniaxial em provetes cilíndricos ou provetes prismáticos (Anexo E).

No caso particular dos ensaios de tracção indirecta por compressão diametral de provetes cilíndricos, o anexo correspondente (Anexo C) descreve o equipamento de ensaio, o modo de preparação e condicionamento dos provetes, o método de ensaio e o modo de determinação do módulo de rigidez dos provetes.

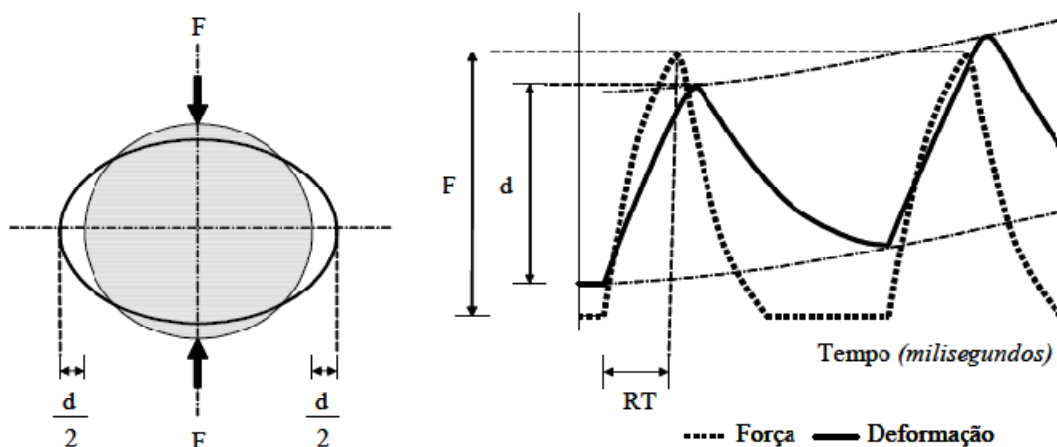
O ensaio de tracção indirecta utiliza provetes cilíndricos moldados em laboratório ou obtidos em sondagens à rotação realizadas nas camadas betuminosas dos pavimentos.

Equipamento de ensaio

- Termómetro
- Vidro ou chapa de aço
- Máquina de ensaio de tracção indirecta por compressão diametral

Procedimento

- Realiza-se primeiramente a preparação dos provetes, devendo estes ter uma espessura entre 30 mm e 75 mm e um diâmetro nominal de 80 mm, 100 mm, 120 mm, 150 mm ou 200 mm. A espessura de cada amostra deve ser medida em conformidade com a norma EN 12627-29. Usando um marcador, marcar um diâmetro numa face plana do provete e marcar um segundo diâmetro a $(90 \pm 10)^\circ$ em relação ao primeiro.
- Procede-se ao armazenamento dos provetes. O armazenamento quando é inferior a 4 dias, a temperatura de armazenamento não deve ultrapassar 25°C . Para o armazenamento de 4 dias, a temperatura não deve exceder 5°C . As temperaturas de armazenamento e tempo devem ser registadas. Os provetes devem ser armazenados numa face plana sobre uma superfície horizontal.
- A temperatura da amostra será controlada e monitorizada até se atingir a temperatura de ensaio. A temperatura de ensaio deve ser de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ da temperatura a atingir.
- Os rolos de carga devem ser limpos e amostra será levada à máquina de ensaio com um dos diâmetros marcados na vertical.
- Os provetes são submetidos a um carregamento repetido de compressão diametral, que desenvolve um estado de tensão horizontal de tracção uniforme ao longo do plano diametral de aplicação da carga. Este estado de tensão induz a deformação (d) do provete conforme se representa na Figura 15-a.
- Durante o ensaio, é registada a curva da deformação medida no provete, segundo a direcção diametral perpendicular ao plano de actuação da carga, e a curva correspondente ao impulso da força. Estas curvas têm a forma que se representa na figura 15-b. O impulso da força é caracterizado pela amplitude (F) e pelo tempo de crescimento da carga (RT). O tempo de crescimento da carga é o período de tempo decorrido desde o instante inicial de aplicação da força até ao instante em que se regista o respectivo valor máximo e está relacionado com a frequência de aplicação da carga. O valor recomendado para o tempo de crescimento da carga é de 124 ± 4 milissegundos.
- Em cada ensaio, o provete é submetido a várias repetições da carga, antecedidas sempre de uma fase de pré-carregamento com repetições de carga de valor igual, para ajustamento do sistema de aplicação de carga ao provete.
- Para cada provete é realizado o ensaio segundo duas direcções diametraes e ortogonais, definindo-se o módulo de rigidez do provete como o valor médio dos dois ensaios.



(a) Carregamento e deformação

(b) Curvas da força e deformação

Fig. 15 - Princípio de carregamento e deformação do provete no ensaio de tracção indirecta

Cálculos

Nestas condições de carregamento dos provetes, o módulo de rigidez (S_m) para cada carga é calculado com base na seguinte equação:

$$S_m = \frac{F \times (\nu + 0,27)}{d \times h} \quad (11)$$

Onde:

F é a amplitude da carga (N)

d é a deformação total segundo a direcção diametral perpendicular ao plano de actuação da carga (mm);

h é a espessura do provete (mm);

ν é o coeficiente de Poisson do provete à temperatura do ensaio.

Relatório de ensaio

O relatório deverá conter as seguintes informações:

Geral:

- a) Nome e endereço do laboratório de ensaio;
- b) Um único número de série para o relatório de ensaio;
- c) Nome do cliente;
- d) O número e a data da presente norma;
- e) Assinatura do responsável técnico pela elaboração do relatório de ensaio;
- f) Data de emissão.

Informações sobre a amostra:

- a) O tipo e a origem da mistura betuminosa;
- b) O método de fabrico da mistura betuminosa;
- c) O método de compactação.

Informações sobre o método de ensaio

- a) O método de ensaio utilizado (pôr referência o respectivo anexo deste documento);
- b) Equipamentos de ensaio.

Informações sobre o ensaio e resultados

- a) Identificação da amostra;
- b) A densidade da amostra antes do ensaio, e do método utilizado para a sua determinação;
- c) Temperatura em que o ensaio foi realizado;
- d) Frequência (ou tempo de carga);
- e) A tensão ou deslocamento;
- f) O módulo de rigidez.

5

CONCLUSÃO

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em conta a já referida importância das infra-estruturas rodoviárias no panorama nacional, em termos de mobilidade, torna-se substancial que estas manifestem um nível elevado de qualidade que permita satisfazer os utentes, garantindo condições de segurança, conforto, economia e qualidade ambiental. O conhecimento das características dos materiais constituintes dos pavimentos, os métodos de ensaio utilizados na sua determinação, e sobretudo as especificações que estes devem respeitar torna-se fundamental para se atingirem os objectivos enunciados.

Sendo a rede rodoviária nacional constituída maioritariamente por pavimentos flexíveis, o estudo das misturas betuminosas, que são o principal constituinte deste tipo de pavimentos, assume uma relevância reforçada. Com o aumento registado do volume e agressividade do tráfego, a ocorrência de degradações associadas aos principais mecanismos de ruína do pavimento é mais frequente e, assim sendo, é exigida uma maior qualidade dos pavimentos e consequentemente das misturas betuminosas. Deste modo, a sustentabilidade dos pavimentos e das misturas betuminosas deve ser garantida.

Indo ao encontro destes objectivos, a comissão técnica europeia CEN/TC227 “Road Materials” tem contribuído bastante no desenvolvimento de documentos normativos referentes à temática em questão, assim como a comissão técnica nacional CT 129, que tem vindo a acompanhar a actividade normativa desenvolvida pela CEN/TC 227.

Tendo em consideração o contributo prestado pelo desenvolvimento da actividade normativa no estabelecimento de garantias de qualidade das misturas betuminosas e dos pavimentos rodoviários, pretendeu-se com o presente trabalho ser um complemento ao trabalho desenvolvido pelas comissões técnicas de normalização.

No segundo capítulo pretendeu-se contribuir para o aprofundamento dos conhecimentos sobre as misturas betuminosas. Com base numa alargada investigação bibliográfica sobre esta temática, procurou-se descrever a sua composição, os métodos utilizados na formulação de misturas betuminosas, assim como se foi feito um enquadramento normativo para as misturas betuminosas, especialmente no respeitante à marcação CE. Neste capítulo foi possível conhecer as particularidades das misturas betuminosas, que as tornam hoje em dia um dos materiais mais utilizados na constituição das camadas mais nobres dos pavimentos rodoviários.

No terceiro capítulo, foram apresentadas e analisadas as normas europeias de métodos de ensaio para misturas betuminosas. A análise efectuada consistiu em fazer uma subdivisão de normas, organizando-

as tematicamente. Esta subdivisão baseou-se fundamentalmente em fazer uma correspondência entre as normas EN 13108-1, a EN 13108-20 e a série de normas EN 12697. Foram definidos vários grupos e procurou-se enquadrar da melhor forma as normas nesses mesmos grupos, de acordo com a sua temática de estudo. Há normas que não se enquadram em nenhum dos grupos formados, este facto pode-se dever ao facto de nesta análise apenas se ter considerado como base o betão betuminoso, especificado na norma EN 13108-1, por isso algumas dessas normas poderiam enquadrar-se perfeitamente noutra análise considerando outro tipo de mistura betuminosa.

Neste capítulo, apresentou-se ainda o resultado de uma pesquisa acerca dos métodos de ensaio utilizados por alguns dos principais laboratórios nacionais para misturas betuminosas, permitindo assim verificar o estado actual da aplicabilidade das normas europeias. Neste aspecto, é possível concluir que a aplicação destas novas normas pelos laboratórios estudados nesta pesquisa ainda é escassa, principalmente devido ao desconhecimento e in experiência de utilização dos métodos de ensaio preconizados por estas. No entanto têm vindo a ser feitos esforços no meio técnico nacional, para acelerar o processo de aplicação das normas europeias nos ensaios de misturas betuminosas, sempre no sentido de as aplicar da melhor forma possível e dando-lhes a importância que carecem. Um dos exemplos é o estudo interlaboratorial apresentado no presente trabalho, que demonstra o objectivo claro do meio técnico nacional da especialidade em criar bases para uma melhor introdução destes novos métodos de ensaio no panorama nacional.

No quarto capítulo, descreveu-se de forma resumida o modo de aplicação de alguns métodos de ensaio para misturas betuminosas preconizados nas normas europeias. Procurou-se deste modo dar a conhecer o conteúdo das normas, indicando os procedimentos a seguir, os cálculos e o conteúdo do relatório de ensaio.

Conclui-se com através da análise da bibliografia consultado na realização do presente trabalho que, futuramente a formulação das misturas betuminosas seguirá uma abordagem fundamental que define a mistura betuminosa em termos de requisitos baseados no desempenho em associação com reduzida prescrição da composição e dos materiais constituintes, oferecendo assim um maior grau de liberdade.

É possível concluir que a presente dissertação será uma mais-valia para dar a conhecer e entender as normas europeias referentes às misturas betuminosas, podendo servir de suporte de orientação ao estudo e aplicação, sobretudo dos métodos de ensaio para misturas betuminosas preconizados nessas normas.

5.2. SUGESTÕES PARA INVESTIGAÇÃO FUTURA

A presente dissertação visa sobretudo dar uma visão geral dos métodos de ensaio para misturas a quente preconizados nas normas europeias, no entanto, o conhecimento destas normas ainda pode ser mais aprofundado em investigações futuras.

Assim sendo, sugerem-se as seguintes propostas para possíveis investigações futuras:

- Análise detalhada dos diferentes métodos de ensaio preconizados nas normas europeias, sobretudo dos métodos de ensaio referentes à determinação das propriedades fundamentais das misturas betuminosas.
- Realização de ensaios de comparação interlaboratorial para as diferentes normas, com vista a obter valores de referência no panorama nacional.
- Formulação de misturas betuminosas em laboratório com base numa abordagem fundamental, de acordo com as normas europeias.

BIBLIOGRAFIA

Antunes, M. (1993). *Avaliação da Capacidade de Carga de Pavimentos Utilizando Ensaio Dinâmicos*. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Antunes, M. L. (2007). *Jornadas de normalização*.

Antunes, M. L., Freire, A.C. (2003). *Agregados para misturas betuminosas*. Sociedade Portuguesa de Geotecnia, LNEC, Lisboa.

APORBET (1998). *Misturas Betuminosas. Contribuição para a Normalização do Fabrico e Aplicação*. Associação Portuguesa de Fabricantes de Misturas Betuminosas, Lisboa.

Asphalt Institute (1981). *Cause and Prevention of Stripping in Asphaltic Pavements. Educational Series No. 10*. Asphalt Institute, Kentucky.

Asphalt Institute (1989). *The Asphalt Handbook. Manual Series No. 4 (MS-4)*. Asphalt Institute, Kentucky.

Azevedo, M. C. M. (1993). *Características Mecânicas de Misturas Betuminosas para Camadas de Base de Pavimentos*. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Branco, F., Pereira, P., Santos, L. P. (2006). *Pavimentos Rodoviários*. Edições Almedina, Coimbra.

Capitão, S.D. (1996). *Misturas Betuminosas de Alto Módulo de Deformabilidade. Contribuição para a Caracterização do seu Comportamento*. Universidade de Coimbra, Coimbra.

EN 12595 (1996). *Bitumen and bituminous binders – Determination of kinematic viscosity*. CEN, Brussels.

EN 12596 (1996). *Bitumen and bituminous binders – Determination of dynamic viscosity by vacuum capillary*. CEN, Brussels.

EN 12697-1 (2005). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 1: Soluble binder content*. CEN, Brussels.

EN 12697-2 (2002). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 2: Determination of particle size distribution*. CEN, Brussels.

EN 12697-3 (2005). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 3: Bitumen recovery: Rotary evaporator*. CEN, Brussels.

EN 12697-4 (2005). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 4: Bitumen recovery: Fractionating column*. CEN, Brussels.

EN 12697-5 (2002). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 5: Determination of the maximum density*. CEN, Brussels.

EN 12697-6 (2003). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimen*. CEN, Brussels.

EN 12697-7 (2002). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 7: Determination of bulk density of bituminous specimens by gamma rays*. CEN, Brussels.

EN 12697-8 (2003). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens*. CEN, Brussels.

EN 12697-9 (2002). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 9: Determination of the reference density, gyrator compactor*. CEN, Brussels.

EN 12697-10 (2001). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 10: Compactability*. CEN, Brussels.

EN 12697-11 (2003). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 11: Determination of the affinity between aggregate and bitumen*. CEN, Brussels.

EN 12697-12 (2003). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens*. CEN, Brussels.

EN 12697-13 (2000). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 13: Temperature measurement*. CEN, Brussels.

EN 12697-14 (2000). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 14: Water content*. CEN, Brussels.

EN 12697-15 (2003). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 15: Determination of the segregation sensitivity of bituminous mixtures*. CEN, Brussels.

EN 12697-16 (2004). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 16: Abrasion by studded tyres*. CEN, Brussels.

EN 12697-17 (2004). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 17: Particle loss of porous asphalt specimen*. CEN, Brussels.

EN 12697-18 (2004). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 18: Binder drainage*. CEN, Brussels.

EN 12697-19 (2004). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 19: Permeability of specimen or Marshall specimens*. CEN, Brussels.

EN 12697-20 (2003). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 20: Indentation using cube or Marshall specimen*. CEN, Brussels.

EN 12697-21 (2003). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 21: Indentation using plate specimens*. CEN, Brussels.

EN 12697-22 (2003). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 22: Wheel tracking*. CEN, Brussels.

EN 12697-23 (2003). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 23: Indirect tensile test*. CEN, Brussels.

EN 12697-24 (2003). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 24: Resistance to fatigue*. CEN, Brussels.

EN 12697-25 (2003). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 25: Cyclic compression test*. CEN, Brussels.

- EN 12697-26 (2003). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 26: Stiffness*. CEN, Brussels.
- EN 12697-27 (2000). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 27: Sampling*. CEN, Brussels.
- EN 12697-28 (2000). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 28: Preparation of samples for determining binder content, water content and grading*. CEN, Brussels.
- EN 12697-29 (2003). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 29: Determination of the dimensions of bituminous specimen*. CEN, Brussels.
- EN 12697-30 (2003). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 30: Specimen preparation, impact compactor*. CEN, Brussels.
- EN 12697-31 (2003). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 31: Specimen preparation, gyrator compactor*. CEN, Brussels.
- EN 12697-32 (2003). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 32: Laboratory compaction of bituminous mixtures by vibratory compactor*. CEN, Brussels.
- EN 12697-33 (2003). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt –Part 33: Specimen preparation, slab compactor*. CEN, Brussels.
- EN 12697-34 (2003). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 34: Marshall test*. CEN, Brussels.
- EN 12697-35 (2003). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 35: Laboratory mixing*. CEN, Brussels.
- EN 12697-36 (2003). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 36: Method for the determination of the thickness of a bituminous pavement*. CEN, Brussels.
- EN 12697-37 (2003). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 37: Hot sand test for the adhesivity of binder on pre-coated chippings for hot rolled asphalt*. CEN, Brussels.
- EN 12697-38 (2004). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 38: Common equipment and Calibration*. CEN, Brussels.
- EN 12697-39 (2003). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 39: Binder content by ignition*. CEN, Brussels.
- EN 12697-40 (2006). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 40: In-situ drainability of porous asphalt*. CEN, Brussels.
- EN 12697-41 (2003). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 41: Resistance to de-icing fluids*. CEN, Brussels.
- EN 12697-42 (2006). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 42: Amount of foreign matter in reclaimed asphalt*. CEN, Brussels.
- EN 12697-43 (2005). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 43: Resistance to fuel*. CEN, Brussels.
- EN 12697-44 (2008). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 44: Crack propagation by semi-circular bending test*. CEN, Brussels.

EN 12697-45 (2009). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 45: Saturation ageing tensile stiffness (SATS) conditioning test*. CEN, Brussels.

EN 12697-46 (2008). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 46: Low temperature cracking and properties*. CEN, Brussels.

EN 12697-47 (2009). *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 47: Determination of the ash content of Lake Asphalt*. CEN, Brussels.

EN 13043 (2002). *Aggregates for bituminous mixtures and surface treatments for roads, airfields and other trafficked areas*. CEN, Brussels.

EN 13108-1 (2006). *Bituminous mixtures Material specifications – Part 1: Asphalt Concrete*. CEN, Brussels.

EN 13108-2 (2006). *Bituminous mixtures Material specifications – Part 2: Asphalt Concrete for very thin layers*. CEN, Brussels.

EN 13108-3 (2006). *Bituminous mixtures Material specifications – Part 3: Soft Asphalt*. CEN, Brussels.

EN 13108-4 (2006). *Bituminous mixtures Material specifications – Part 4: Hot Rolled Asphalt*. CEN, Brussels.

EN 13108-5 (2006). *Bituminous mixtures Material specifications – Part 5: Stone Mastic Asphalt*. CEN, Brussels.

EN 13108-6 (2006). *Bituminous mixtures Material specifications – Part 6: Mastic Asphalt*. CEN, Brussels.

EN 13108-7 (2006). *Bituminous mixtures Material specifications – Part 7: Porous Asphalt*. CEN, Brussels.

EN 13108-8 (2006). *Bituminous mixtures Material specifications – Part 8: Reclaimed asphalt*. CEN, Brussels.

EN 13108-20 (2006). *Bituminous mixtures Material specifications – Part 20: Type Testing*. CEN, Brussels.

EN 13108-21 (2006). *Bituminous mixtures Material specifications – Part 21: Factory Production Control*. CEN, Brussels.

EN 1426 (2007). *Bitumen and bituminous binders – Determination of needle penetration*. CEN, Brussels.

EN 1427 (2007). *Bitumen and bituminous binders – Determination of softening point” – Ring and ball method*. CEN, Brussels.

EN 933-1 (1997). *Test for geometrical properties of aggregates – Part 1: Determination of particle size distribution – Sieving method*. CEN, Brussels.

EN 933-10 (2001). *Test for geometrical properties of aggregates – Part 10: Assessment of fines – Grading of fillers (air jet sieving)*. CEN, Brussels.

EP-IEP-JAE (1995). *Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional*. Junta Autónoma de Estradas, Almada.

Estradas de Portugal (2009). *Caderno de encargos tipo obra. Pavimentação*. Estradas de Portugal, Almada.

Haas, R., Hudson, W. R. (1978). *Pavement Management Systems*. , McGraw-Hill, New York.

Instituto de infra-estruturas rodoviárias, IP (2009). *Directivas para a concepção de pavimentos. Critérios de dimensionamento*.

JAE (1998). *Caderno de Encargos: 03 – Pavimentação*. Vol. V. Junta Autónoma de Estradas, Almada.

LNEC (1962). *Vocabulário de Estradas e Aeródromos - Especificação E1 do LNEC*. Lisboa.

LNEC (2006). *Misturas betuminosas para pavimentos rodoviários e aeroportuários - Documento de aplicação*. Lisboa.

Luminari, M., Fidato, A. (1998). *Bituminous Binders and Mixes. State of Art and Interlaboratory Tests on Mechanical Behaviour and Mix Design*. Francken, L. (ed.), E & FN Spon, London.

Picado Santos, L. P. (2005). *Formulação de Misturas Betuminosas a Quente*. Universidade de Coimbra, Coimbra.

Ribeiro, J., Teixeira, A., Azevedo, M., Fortes, R. (2005). *PAVIMENTOS SUSTENTÁVEIS - IV jornadas luso-brasileiras de pavimentos*. FEUP, Porto.

Ribeiro, Jaime (2008). *Pavimentos 1, Textos didácticos*. FEUP, Porto

Ribeiro, Jaime (2008). *Pavimentos 2, Textos didácticos*. FEUP, Porto

Silva, H. M. R. D. (2002). *Formulação de Misturas Betuminosas*. Universidade do Minho, Braga.

Texas Department of Transportation (2004). *Bituminous Test Procedures Manual*. Texas Department of Transportation, Austin.

[1]<http://www.inir.pt/portal/LinkClick.aspx?fileticket=Ye%2bQ60FCiS4%3d&tabid=114&mid=485&language=pt-PT> 18/10/2009

[2]<http://www.controlsgroup.net/products> 08/12/2009

[3]http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/5981/2/Tese_Doutoramento_vfinal%20PARTE2.pdf 03/10/2009

[4]http://www.proasfalto.com.br/pdf/ProAsfalto_capitulo_09.pdf 03/10/2009

[5]<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-01122006-142419/> 03/10/2009